



KORKEAN RAKENNUKSEN PAINESUHDESELVITYS

Case Tampereen tornihotelli

Erkka Aattela

Opinnäytetyö
Tammikuu 2015
Talotekniikan koulutus
LVI-talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutus
LVI-talotekniikka

AATTELA, ERKKA:
Korkean rakennuksen painesuhdeselvitys
Case Tampereen tornihotelli

Opinnäytetyö 47 sivua
Tammikuu 2015

Tämä opinnäytetyö on tehty Sweco Talotekniikka Oy:lle perusselvitykseksi tarkentamaan korkeisiin rakennuksiin kohdistuvia painevaikutuksia, sillä Suomessa korkeasta rakentamisesta on toistaiseksi vielä vähän kokemusta ja tietoa. Opinnäytetyössä tarkastellaan ensin painesuhteiden muutoksia aiheuttavia ilmiöitä yleisesti, minkä jälkeen niitä sovelletaan korkean rakennuksen painesuhteiden selvittämiseen. Painesuhteita tarkastellaan enimmäkseen tuulen- ja savupiippuvaikutuksen osalta laskemalla sekä mittaamalla. Laskelmissa määritellään tuulen nopeuden logaritminen kasvu korkeuden kasvaessa, sekä tuulen aiheuttama painevaikutus korkean rakennuksen ulkoseiniin. Lisäksi lasketaan tornihotellin savupiippuvaikutuksen teoreettinen voimakkuus. Lopuksi laskettuja ja mitattuja tuloksia verrataan toisiinsa.

Saadut tulokset vastaavat hyvin paljon teoriaosuudessa käsiteltyjä oletuksia ja laskemalla saatuja tuloksia. Savupiippuvaikutus aiheuttaa tornihotellin yläkertaan ylipainetta ja alakertaan alipainetta. Savupiippuvaikutus voimistuu lämpötilaerojen kasvaessa ulko- ja sisäilman välillä. Alakerran alipaineisuuden voi havainnoida pääsisäänkäynnin vetoisuudessa ja hissien korkeassa vihellyksessä. Mittaustuloksia sekoittaa tuulen voimakas painevaikutus tuulelta suojaamattomiin paine-eromittareihin, jotka sijaitsevat ainoastaan läntisellä ulkoseinällä.

Painesuhdeselvityksestä saataisiin luotettavampi kattavammilla mittaroinilla. Paine-eromittareita tulisi sijoittaa kullekin pääilmansuunnan ulkoseinälle siten, ettei tuuli pääse puhaltamaan suoraan mittaputkeen. Tällöin pystyttäisiin erittelemään savupiippuvaikutuksen ja tuulen vaikutuksen tuloksia. Lisäksi tornihotellin katolle sijoitettava sääasema antaisi enemmän tietoja tuulioloista.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services
HVAC Building Services Engineering

ERKKA, AATTELA:
Pressure Ratio Report for Tall Buildings
Case Tampere's tower hotel

Bachelor's thesis 47 pages
January 2015

This thesis is made for Sweco building services Ltd. as a basic study on pressure effects in high-rise buildings. In Finland there is still little experience and knowledge about construction of tall buildings. The thesis will first examine the phenomena that cause changes in the pressure relations in general, after which they are applied to determine the pressure ratios of the tall building. The pressure relations regarding the wind and stack effect are studied by calculating and measuring them. In the calculations the logarithmic increase in wind speed is defined when increasing height, and pressure effect caused by wind on outside walls of high-rise building. In addition, the tower hotel's theoretical stack effect intensity is calculated. Finally, the calculated and measured results are compared with each other.

The obtained results correspond well to the assumptions considered in the theoretical framework as well as the calculations. Stack effect causes overpressure to upper floors of the hotel and underpressure to the lower levels of the hotel. The stack effect intensifies as the temperature difference between indoor air and outdoor air increases. The under pressurization of the hotel downstairs can be detected as a draft at the main entrance as well as high whistling of the elevators. Some of the measurement results are distorted because of the strong pressure effect of the wind blowing right to the unprotected pressure gauges, which are located only at the western outer wall.

For achieving more accurate results, the research requires more comprehensive metering. Pressure difference meters should be placed at each cardinal outer walls so that the wind cannot blow directly into the measuring tube. This way, the results can be specified separately to analyze the influence of the stack effect and the impact of the wind. In addition, placing weather station on the roof of the hotel could give additional clarity for monitoring the wind conditions.

Key words: Pressure ratio, stack effect, wind, tall building

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	PAINESUHTEISTA	6
2.1	Tuuli.....	8
2.1.1	Tuulen vaikutus rakennuksen painesuhteisiin.....	9
2.2	Savupiippuvaikutus.....	11
2.2.1	Savupiippuvaikutus rakennuksessa.....	12
2.3	Ilmastointi	15
2.4	Yhteisvaikutus	16
3	PAINESUHDESELVITYS, CASE TAMPEREEN TORNIHOTELLI.....	17
3.1	Solo Sokos hotel torni Tampere.....	17
3.2	Oletukset	17
3.3	Tuuli laskennallisesti	20
3.4	Savupiippuvaikutus laskennallisesti	26
3.5	Mittaukset	29
3.5.1	Mittaustapa ja havainnot	30
3.5.2	Pistokoemittaukset	31
3.5.3	Kiinteistöautomaation mittaukset	34
3.5.4	Tuulen vaikutus.....	36
3.6	Tuloksien tarkastelu ja vertailu	39
4	POHDINTA.....	45
	LÄHTEET.....	47

1 JOHDANTO

Korkeita rakennuksia on Suomessa vielä vähän, mutta ne ovat yleistymässä. Yli 60 metriä korkeita hotelleja ja asuinrakennuksia Suomesta löytyy nykyään noin kymmenen kappaletta. Korkeiden rakennusten vähäisyys tarkoittaa sitä, että niiden suunnittelun ja rakentamisen taustalla on vielä vähän käytännön kokemusta. Korkeiden rakennusten rakentaminen Suomessa vaatii huomiota erityisesti vuodenaikojen vaihtelujen vuoksi. Suomen rakentamismääräyskokoelmasta löytyy yleisiä ohjeita ja määräyksiä tyypillisille rakennuksille, mutta selkeää opastusta ei korkeille rakennuksille ole.

Toisin kuin Suomessa, muualla maailmassa on korkeasta rakentamisesta monien vuosikymmenien kokemus. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. eli lyhyesti ASHRAE, on eritellyt korkean rakennuksen keskeiset määritelmät. Korkea rakennus on yli 300 jalkaa (noin 91 metriä) korkea ja rakennuksen korkeus vaikuttaa rakennushankkeen suunnitteluun merkitsevästi. Lisäksi korkean rakennuksen hätäevakuointi sekä tulipalon sammutus on korkeuden takia vaikeaa (Ross 2004).

Opinnäytetyö käsittelee Sweco Talotekniikka Oy:n, suunnitteleman Tampereen tornihotellin painesuhteita. Opinnäytetyössä on tavoitteena määrittää paine-eroja aiheuttavat tekijät korkeassa rakennuksessa, sekä selvittää miten paine-erot vaikuttavat rakennukseen. Lisäksi tavoitteena on tutkia painesuhteiden profiileja eri ulkoilmaolosuhteissa. Opinnäytetyössä tarkastellaan, kuinka paine-eroja syntyy rakennuksiin yleisesti ja todennetaan niiden voimakkuuksia laskemalla sekä mittaamalla. Lisäksi vertaillaan, ovatko laskemalla saadut tulokset todellista tilannetta vastaavia. Painesuhdeselvitys tarkastelee enimmäkseen savupiippuvaikutuksen aiheuttamia paine-eroja korkeassa rakennuksessa, koska ne ovat tarkemmin mitattavissa lyhyellä aikavälillä. Tuulen vaikutusta rakennukseen tutkitaan pienemmällä painoarvolla, sillä tuulen aiheuttamien paine-erojen selvittäminen vaatisi perinpohjaiset mittaukset ja paikkakuntaakohtaisen tuuliprofiilin tarkan määrittämisen.

Tampereen uusi 25-kerroksinen maamerkki on 88,5 metriä korkea. Viralliselta nimeltään Solo Sokos Hotel Torni on Suomen korkein hotelli. Hotelli avattiin asiakkaille 15. lokakuuta 2014.

2 PAINESUHTEISTA

Rakennuksen painesuhteiden suunnitelluista arvoista poikkeavat tulokset johtuvat pääosin kolmesta tekijästä: sisä- ja ulkoilman lämpötilaeroista, tuulesta sekä ilmanvaihdon paineen korotuksesta. Näissä kaikissa kolmessa tapauksessa ilma pyrkii virtaamaan korkeammasta paineesta matalampaan paineeseen. Rakennuksen painesuhteisiin vaikuttavat myös rakennuksen ilmatiiveys ja käyttötarkoitus. (sisäilmayhdistys 2008)

Ilmanpaineen vaihteluita pystytään ottamaan huomioon suunnittelussa, mutta vähäisen kokemuksen ja dokumentoinnin takia se on hyvin työlästä. Painesuhteista löytyy kuitenkin tietoa yleisesti. Esimerkiksi Esa Sandberg on koonnut huomioitavat paine- ja ilmavirtamuutoksiin vaikuttavat tekijät:

- *terminen paine-ero*
- *ilmakanaviston painetaso*
- *ilmakanaviston tiiviys*
- *rakennuksen ulkovaipan tiiviys*
- *rakennuksen sisäseinien, välipohjien ja ovien tiiviyydet.*

(Sandberg 2014)

Rakennuksen ilmanpitävyys on tärkeä osa painesuhteiden hallintaa. Rakennuksen sisäilmastoa, kosteusoloja ja vaipan rakenteiden ilmanpitävyyden ohjeita ja määräyksiä käsittelevät Suomen rakentamismääräyskokoelman osat D2, C2 ja C3. On kuitenkin huomioitava, että määräykset käsittelevät tyypillisiä rakennuksia ja eivät ota huomioon rakennuksen korkeudesta johtuvia erityistarpeita.

Rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa on terveellisen, turvallisen ja viihtyisän sisäilmaston saavuttamiseksi otettava yleensä huomioon seuraavat rakennukseen vaikuttavat tekijät:

- *sisäiset kuormitustekijät kuten lämpö- ja kosteuskuormitus, henkilökuormat, prosessit sekä rakennus ja sisustusmateriaalien päästöt*
- *ulkoiset kuormitustekijät kuten sää- ja ääniolot, ulkoilmanlaatu ja muut ympäristötekijät*
- *sijainti ja rakennuspaikka*

(Suomen RakMK D2 2012, 5)

Terveellisen, turvallisen ja viihtyisän sisäilmaston saavuttaminen tulee varmistaa, kun

- *suunnitellaan rakennuksen ja lämmön- ja kosteudeneristystä sekä ikkunoiden ominaisuuksia*
- *määritellään rakennuksen ulkovaipan, alapohjan ja roilojen ilmanpitävyyttä sekä tilojen välisten rakenteiden ilmanpitävyyttä*

(Suomen RakMK D2 2012, 5)

Rakennuksen vaipan sekä tilojen välisten rakenteiden tulee olla niin ilmanpitäviä, että vuotokohtien läpi tapahtuvat ilmavirtaukset eivät aiheuta merkittäviä haittoja rakennuksen käyttäjille tai rakenteilla ja rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä voi toimia suunnitellusti. Erityistä huomiota tulee kiinnittää rakenteiden liitosten ja läpivientien suunnitteluun sekä rakennustyön huolellisuuteen. Rakenteisiin on tarvittaessa tehtävä erillinen ilmasulku. Ikkunan ja oven liittymien ympäröiviin rakenteisiin tulee olla ilmanpitäviä. Karmin ja puitteen tiivistämiseen käytettävien tarvikkeiden tulee olla sellaisia, että ne kestävät käytössä esiintyvät rasitukset oleellisesti vaurioitumatta eivätkä aiheuta vaurioitumisen vaaraa ympäröiville rakenteille. (Suomen RakMK C3 2010, 5)

Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysohjeen soveltamisopas on määrittänyt painesuhteiden tavoitteellisia paine-eroja eri ilmanvaihtojärjestelmillä. Rakennuksen suuret paine-erot voivat kertoa ilmanvaihtojärjestelmän puutteellisuudesta. Taulukosta 1 ilmevät tavoitteelliset paine-erot ulkoilmaan ja porraskäytävään nähden.

TAULUKKO 1. Eri ilmanvaihtojärjestelmien tavoitteelliset paine-erot (miinusmerkki paine-erossa tarkoittaa sitä, että ilmapaine sisällä on pienempi kuin ulkona)

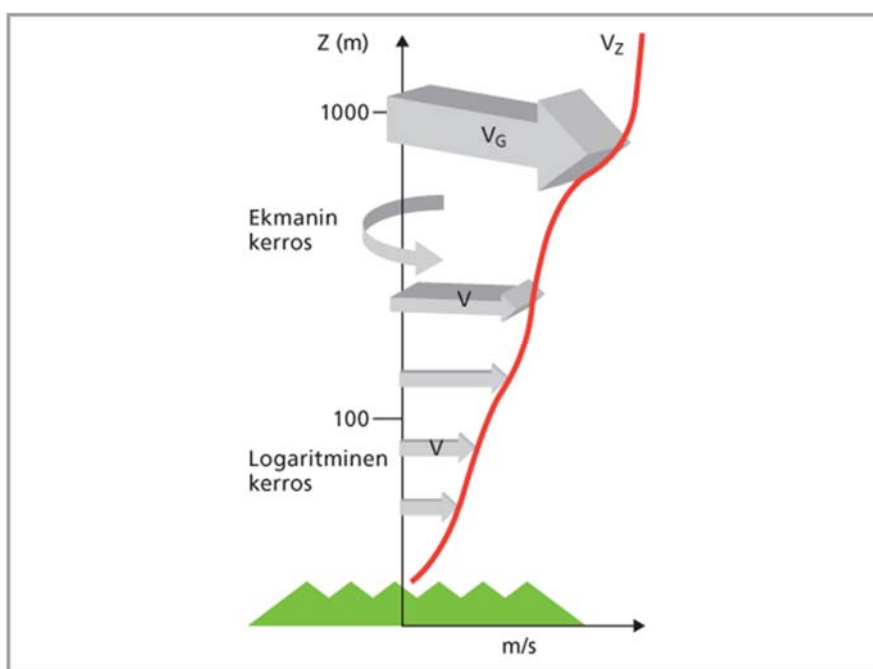
Ilmanvaihtotapa	Paine-ero	Huomautuksia
Painovoimainen ilmanvaihto	0...-5 Pa ulkoilmaan \pm 0 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat voimakkaasti sään mukaan
Koneellinen poistoilmanvaihto	-5...-20 Pa ulkoilmaan 0...-5 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat sään mukaan
Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, ilmanvaihtolämmitys	0...-2 Pa ulkoilmaan \pm 0 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat sään mukaan

(Asumisterveysopas 2009, 64)

2.1 Tuuli

Suomi on tuulisimmillaan lämmityskausina ja vallitsevin tuulensuunta on lounaistuuli. Tämä johtuu pääosin Atlantilta maahamme suuntautuvista matalapaineista. Tuulen nopeus kasvaa korkeuden kasvaessa. Tuulen nopeuteen vaikuttaa korkeuden lisäksi maaston epätasaisuus ja ilman terminen tasapainotila. Tuulen nopeuden muutos korkeussuunnassa on pienempää avoimilla alueilla kuten pelloilla ja merialueilla verrattuna metsä- ja kaupunkialueisiin. Tämä johtuu siitä, että maaston epätasaisuuden aiheuttama pintakitka hidastaa ilmamassoja. Suomessa maaston pintakitkan vaikutusalue vaihtelee 100m – 1000m välillä. Tällä rajakerroksella tuuli on lähes aina turbulентista. Rajakerroksen alaosissa sijaitsee pintakerros, jossa tuulen voimakkuus kasvaa logaritmisesti korkeuden kasvaessa. Pintakerroksen korkeus on noin kymmenen prosenttia rajakerroksen korkeudesta. (Suomen tuuliatlas 2015)

Kaupungit ovat hyvin epätasaisia alueita, mikä tarkoittaa, että tuulen nopeuden kasvu korkeuden kasvaessa on suurempaa kuin tasaisilla alueilla. Kaupunkien rakennukset tuovat maastolle paljon epätasaisuutta ja siten vaikuttavat tuuliprofiiliin ja ilmavirtauksien pyörteisiin. Rakennuksien aiheuttamat maastonmuutokset tekevät tuulen vaikutusten mallintamisesta vaikeaa. Kuva 1 havainnollistaa pintakerroksessa tapahtuvan logaritmisin muutoksen tuulen nopeudessa (Suomen tuulivoimayhdistys ry 2015).



KUVA 1. Tuulen nopeuden vertikaalinen kasvu (Suomen tuuliatlas 2015).

Tuulen nopeuden logaritmista kasvua voidaan määrittää kaavoilla 1 ja 2. Kaavalla 1 määritetään ensin kinemaattinen pintastressi, jonka avulla voidaan laskea tuulen nopeus halutulla korkeudella $u(z)$ käyttämällä kaavaa 2. Kaava 2 on supistettu vastaamaan neutraaleja sääolosuhteita.

KAAVA 1.

$$u_* = k \left(\frac{u(z)}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \right) \quad (1)$$

missä,

$u(z)$ = tuulen nopeus korkeudella z [m/s]

u^* = kitkanopeus eli kinemaattinen pintastressi [m/s]

k = von Kármán'n vakio, joka on suuruusluokkaa (0,4)

z_0 = pinnan rosoisuutta kuvaava parametri [m]

z = korkeus metreinä

(Suomen tuulivoimayhdistys ry 2015)

KAAVA 2.

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2)$$

missä,

$u(z)$ = tuulen nopeus korkeudella z [m/s]

u^* = kitkanopeus [m/s]

k = von Kármán'n vakio (0,4)

z_0 = pinnan rosoisuutta kuvaava parametri [m]

z = korkeus metreinä

(Suomen tuuliatlas 2015)

2.1.1 Tuulen vaikutus rakennuksen painesuhteisiin

Tuulen aiheuttamat paine-erot rakennuksessa vaihtelevat suuruudeltaan tuulen lailla. Tuulen vaikutus riippuu tuulen suunnasta ja suuruudesta, rakennuksen fyysisestä ulkomuodosta ja mitoista sekä ympäristöstä. Tuuli täytyy ottaa huomioon rakennuksen suunnitteluvaiheessa, sillä se voi aiheuttaa lyhytaikaisesti suuria paine-eroja ja raken-

teellisiä kuormia rakennukseen. Rakennuksen tiiviys auttaa vähentämään tuulen aiheuttamia paine-eroja sekä parantamaan rakennuksen lämpöviihtyvyyttä (Siikanen 2014).

Tuulen vaikutus rakennukseen vaihtelee paljon ja siksi sitä on vaikea ottaa huomioon suunnittelussa. Korkea rakennus altistuu tuulen vaikutuksille paljon herkemmin kuin matalat rakennukset, jos otetaan huomioon tuulen nopeuden logaritminen voimistuminen korkeuden kasvaessa. Korkeiden rakennusten vähäisyyden vuoksi tornitalot eivät myös saa toisistansa tai muusta ympäristöstä tuulensuojaa.

Tuulen aiheuttamaa painerasitusta rakennuksen ulkoseinillä pystytään laskemaan suuntaa antavasti kaavalla 3.

KAAVA 3.

$$p = \frac{1}{2} c \rho v^2 \quad (3)$$

missä,

c = rakennuksen muodosta ja tuulen suunnasta riippuva vakio

p = yli- tai alipaine rakennuksen ulkoseinämällä [Pa]

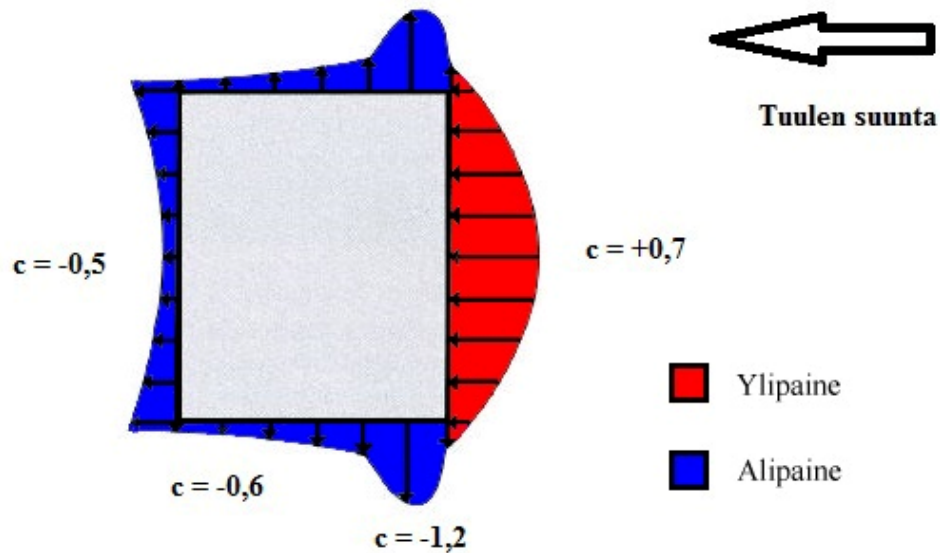
ρ = ulkoilman tiheys [kg/m^3]

v = tuulen nopeus [m/s]

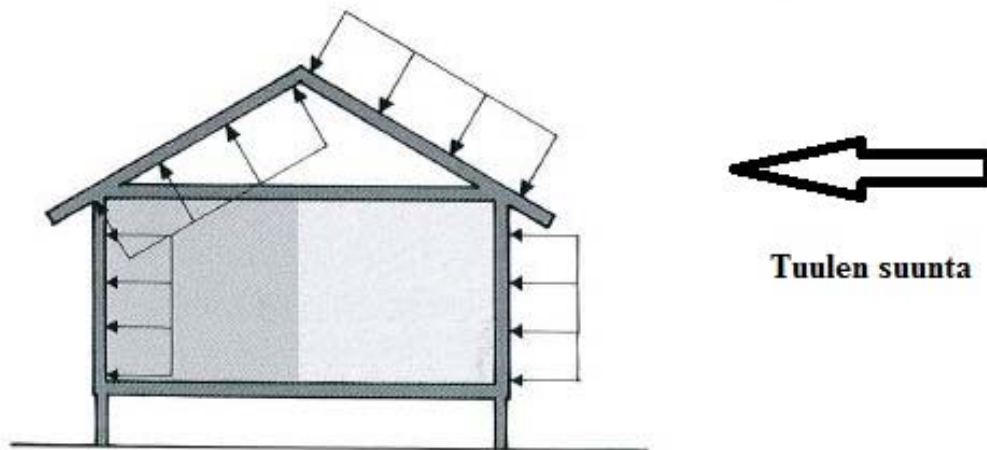
Rakennusfysiikan kirjasta saadaan c :n arvot:

- tuulenpuoleinen seinä +0,7
- suojanpuoleinen seinä -0,5
- tuulen suuntainen seinä -0,6...-1,2

c :n kertoimet vaihtelevat eri tutkijoiden tulosten perusteella. Tuulen aiheuttamaa painekenttää on vaikea laskea, koska muuttujia ja häirttekijöitä on paljon. Kuvissa 1 ja 2 on havainnollistettuna painejakauma rakennuksen ulkoseinämällä. (Siikanen 2014) On huomioitava, että rakennuksen sisälle aiheutuvat painearvot ovat ulkoseinämiin nähden käänteisiä.



KUVA 2. Tuulen aiheuttama painejakauma rakennuksen ulkoseinämiin. (Siikanen 2014, muokattu)



KUVA 3. Tuulen aiheuttama painevaikutus sivustapäin (Siikanen 2014, muokattu).

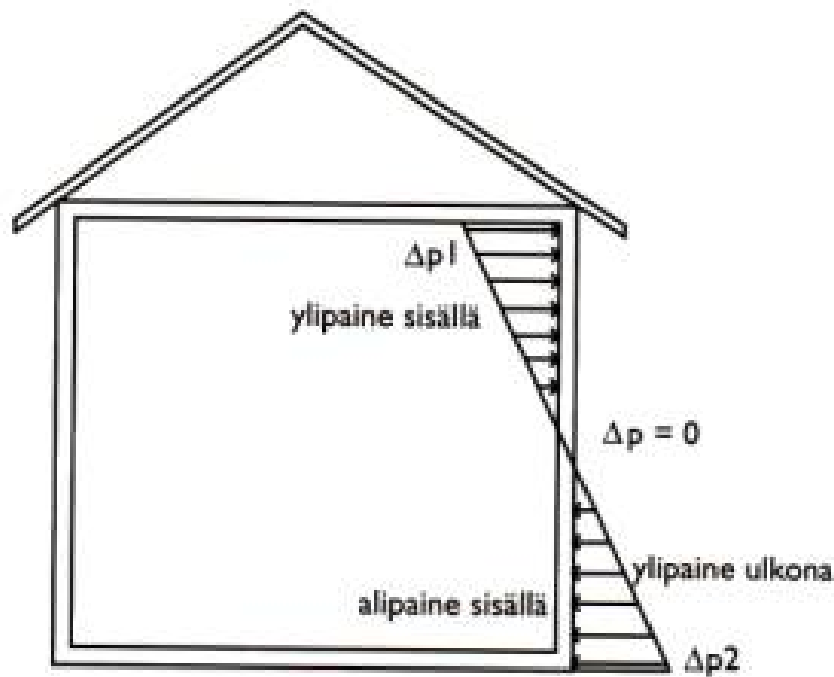
2.2 Savupiippuvaikutus

Vertikaalinen luonnollinen konvektio eli kansankielellä savupiippuvaikutus syntyy ilman lämpötilaeron aiheuttamasta tiheyserosta. Lämmin ilma pyrkii kevyempänä seoksena nousemaan ylös aiheuttaen ilman virtausta ylöspäin. Ylös nousseen lämpimän ilman aiheuttama alipaine korvaantuu viileämmällä ilmalla. Tämän vuoksi tulisijoissakin on ilma-aukot korvausilmalle vedon mahdollistamiseksi. Painovoimainen ilmanvaihto toimii samalla periaatteella, jossa lämmintä huoneilmaa ohjataan ulos aiheuttaen raken-

nukseen alipaineen. Alipainetta tasataan päästämällä korvausilmaa niille tarkoitetuista ilma-aukoista. Painovoimaisessa ilmanvaihdossa rakennuksen ulkoseinät muodostavat ikään kuin savupiipun.

2.2.1 Savupiippuvaikutus rakennuksessa

Savupiippuvaikutus vallitsee jokaisessa rakennuksessa, jossa on eri sisäilman lämpötila kuin rakennuksen ulkopuolella. Savupiippuvaikutuksen takia rakennuksen ulkovaippaan kohdistuu jatkuvasti pieni, mutta pysyvä paine-ero. Suurimmat paine-erot ulkoilmaan verrattuna sijaitsevat rakennuksen ylä- ja alapäissä. Rakennuksen keskiosissa sijaitsee neutraaliakseli, jossa sisä- ja ulkoseinän välillä ei ole paine-eroa. Neutraaliakselin sijainti vaihtelee rakennuskohtaisesti riippuen rakennuksen tiiviyydestä sekä ulkovaipan epätiiveyskohtien korkeusasemista. Neutraaliakselin tarkkaa paikkaa ei pystytä määrittämään laskennallisesti, koska sen määrittämiseen tarvitaan tarkat kerroskohtaiset tiiviyslukemat. Neutraaliakselin sijaintiin vaikuttaa rakennuksen avoimet ja epätiiviot aukot, esimerkiksi ulko-ovet sekä mahdolliset talotekniset aukot. Neutraaliakselin pystyy kuitenkin todentamaan paine-eromittauksilla. Kuvissa 5 ja 6 näkee miten savupiippuvaikutuksen aiheuttamat paine-erot jakautuvat rakennuksessa sekä neutraaliakselin, jossa ei ole paine-eroa lainkaan. Savupiippuvaikutus voi olla myös käänteinen, jos ulkoilma on lämpimämpää kuin rakennuksen sisäilma. Käänteinen savupiippuvaikutus on Suomessa viileämmän ilmaston takia harvinaisempaa. (Siikanen 2014, Sisäilmayhdistys 2008, Ross 2004)



KUVA 4. Savupiippuvaikutuksen painejakauma tasatiiviissä rakennuksessa (Sisäilmäyhdistys 2008).

Savupiippuvaikutusta vahvistaa rakennuksen korkeus, epätiiviyys sekä ulko- ja sisäilman välinen lämpötilaero. Tapauskohtaisesti rakennuksen suuret yhtenäiset korkeat tilat kuten porraskäytävät ja hormit ovat herkkiä muodostamaan savupiippuvaikutusta. Voimakas savupiippuvaikutus voi aiheuttaa ei-toivottuja ilmiöitä rakennuksessa, kuten vedon tunnetta, epäviihtyisiä lämpöoloja ja hajujen siirtymisiä huoneesta toiseen. Pahimmillaan terminen paine-ero voi aiheuttaa rakenteisiin kosteusvaurioita kasvaneen kosteusraituksen takia sekä ongelmia hissien ja ilmanvaihdon toiminnassa. (Ross 2004, Sisäilmäyhdistys 2008, Siikanen 2014).

Lämpötilaerojen synnyttämä paine-ero ulkoilmaan verrattuna voidaan määrittää kaavalla 4. On kuitenkin huomioitava, että kaavalla 4 ei saa selville rakennuksen alaosiin syntyvää alipainetta. Kaavalla 5 sen sijaan saa selville rakennuksen ylä- ja alapäissä vallitsevat paine-erot, koska siinä käytetään suoraan ulko- ja sisäilman tiheyseroa sekä rakennuksen keskiosiin syntyvää neutraaliakselia. Neutraaliakselin sijainnin tarkkaan määrittämiseen tarvitaan painemittauksia, mutta voidaan olettaa sen sijaitsevan tasatiiviin rakennuksen puolivälissä.

KAAVA 4.

$$\Delta p = \left(\frac{T_s - T_u}{T_u}\right) \rho_s g h \quad (4)$$

missä,

Δp = hormissa syntyvä paine-ero [Pa]

T_s = sisäilman absoluuttinen lämpötila [K]

T_u = ulkoilman absoluuttinen lämpötila [K]

ρ_s = sisäilman tiheys [kg/m³]

g = putoamiskiihtyvyys [9,81 m/s²]

h = hormin korkeus [m]

(Sandberg 2014)

KAAVA 5.

$$\Delta p = (\rho_u - \rho_s) h g \quad (5)$$

missä,

Δp = paine-ero [Pa]

ρ_s = sisäilman tiheys [kg/m³]

ρ_u = ulkoilman tiheys [kg/m³]

g = putoamiskiihtyvyys [9,81 m/s²]

h = etäisyys neutraaliakselista [m]

(Siikanen 2014)

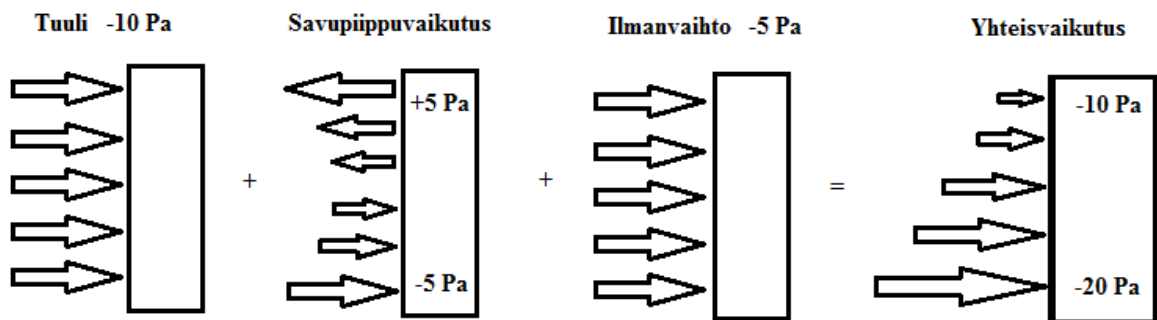
2.3 Ilmastointi

Nykyään suositaan enemmän koneellista ilmanvaihtoa sen energiatehokkuuden takia sekä paremman ilmanlaadun takaamiseksi. Ilmanvaihdon tarkoitus on ylläpitää rakennuksessa terveellinen ja viihtyisä sisäilma. Suomessa rakennuksien ilmanvaihto suunnitellaan hieman alipaineiseksi ulkoilmaan nähden, jotta ulkoilman kosteus ei aiheuttaisi rakennuksen ulkoseiniin kosteusvaurioita. Toisin kuin Yhdysvalloissa, jossa korkeat rakennukset ylipaineistetaan noin viisi prosenttia suuremmalla tuloilmamäärällä, Suomessa rakennuksen lämpimiä sisätiloja ei ylipaineisteta ilmanvaihtoteknisesti. Tästä poikkeuksena ovat esimerkiksi puhdastilat. Nyrkkisääntönä rakennuksen alipaineistamiseen on kymmenen prosenttia suurempi poistoilmamäärä kuin tuloilma. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D2 tarkoittaa rakennuksen alipaineen enimmäismääräksi 30 Pascalia, jotta välttyttäisiin rakenteisiin kohdistuvilta kosteusvaurioilta, sekä mikrobien aiheuttamilta terveyshaitoilta. Liian alipaineiseksi säädetty ilmanvaihto voi myös aiheuttaa vaikeuksia ovien ja ikkunoiden avaamiseen sekä haitallisen radon kaasun kulkumista sisäilmaan alapohjan läpi. (Suomen RakMK D2 2012, Seppänen 2007, Sisäilmayhdistys 2008).

Korkean rakennuksen ilmanvaihto on yleensä järjestetty käyttäen keskitettyä ilmanvaihtoa, jossa ilmanvaihtokoneet sijaitsevat tornitalon keskiosissa sijaitsevassa teknisessä kerroksessa.

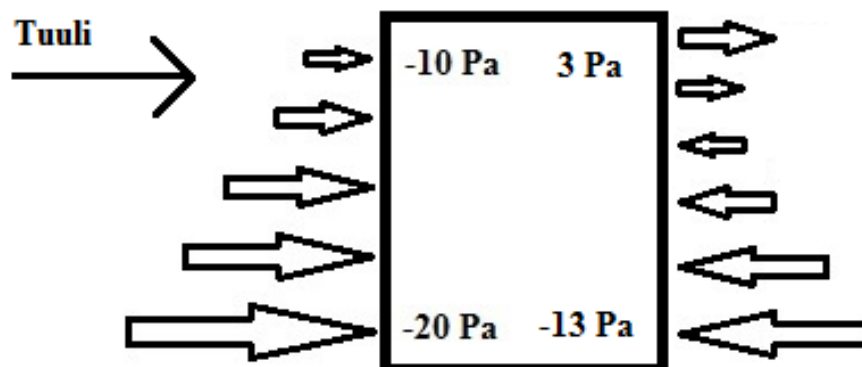
2.4 Yhteisvaikutus

Rakennuksen painesuhteet vaihtelevat edellä mainittujen kolmen tekijän mukaan. Ilmanvaihdon aiheuttama alipaine on hyvin suunniteltua ja kontrolloitua. Savupiippuvai-
 kutus vaihtelee vuodenaikojen mukaan voimistuen talvisin ja heikentyen kesäisin, kun taas tuuli sen sijaan voi muuttaa rakennuksen painesuhteiden jakaumaa useita kertoja vuorokaudessa.



KUVA 5. Painesuhteeseen vaikuttavien tekijöiden summa yhdelle seinälle. Panielukemat ovat havainnollistamassa yhteenlaskua.

Kuvista 5 ja 6 näkee rakennuksen yleiseen painejakaumaan vaikuttavien tekijöiden yhteenlasketun tuloksen esimerkkipanielukemilla. Huomioitavaa on, että tuulen suunta ja suuruus vaikuttaa merkittävästi painejakauman vaihteluun. Kuvassa 5 käytetty tuulen aiheuttama 10 pascalin paine syntyy noin 5m/s tuulen nopeudella (4,8795 m/s).



KUVA 6. Painesuhteeseen vaikuttavien tekijöiden summa tuulen- ja suojanpuoleisilla seinillä

3 PAINESUHDESELVITYS, CASE TAMPEREEN TORNHOTELLI

Tässä luvussa tarkastellaan Tampereen tornihotellin painesuhteita teoreettisesti, laskennallisesti ja mittaamalla. Painesuhdeselvityksessä määritellään rakennukseen syntyviä paine-eroja ja ilmavirtoja tornihotellin ollessa normaalissa käytössä.

3.1 Solo Sokos hotel torni Tampere

Tutkimuskohteena toimi SRV:n urakoima Tampereen tornihotelli, jossa LVIA-suunnittelijana toimi SWECO Talotekniikka Oy. Tornihotelli sijaitsee Tampereen keskustaluokalla rautatieaseman vieressä ja se on rakennettu noin 140 vuotta vanhojen saneerattujen veturitallien yhteyteen.

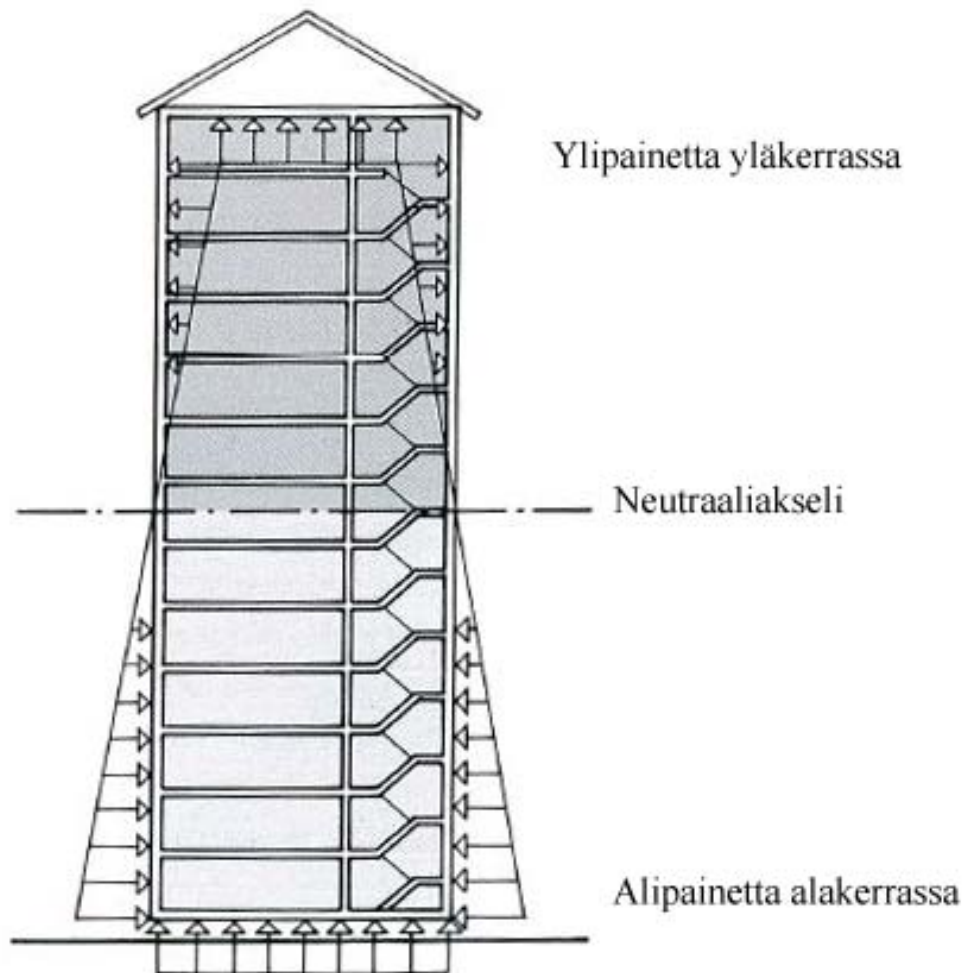
Muutamia yksityiskohtia:

- kohteen pääsisäänkäynnissä on kaksi järeää liiketunnistimilla toimivaa liukuovea
- hotellin ilmanvaihdesta huolehtii kolme ilmapuhaltuslaitetta, joiden yhteinen ilmanvaihtomäärä on 8,5 m³/s. Koneilla ei luoda hotellille alipainetta
- hotellilla on tekninen kerros 17. kerroksessa
- hotellihuoneistoissa on puhallinkonvektorit, joita käytetään huoneiden lämmitykseen ja jäähdytykseen
- hotellissa koko rakennuksen korkeuden kattava porraskäytävä sekä neljä hissiä, joista yksi on palomieshissi

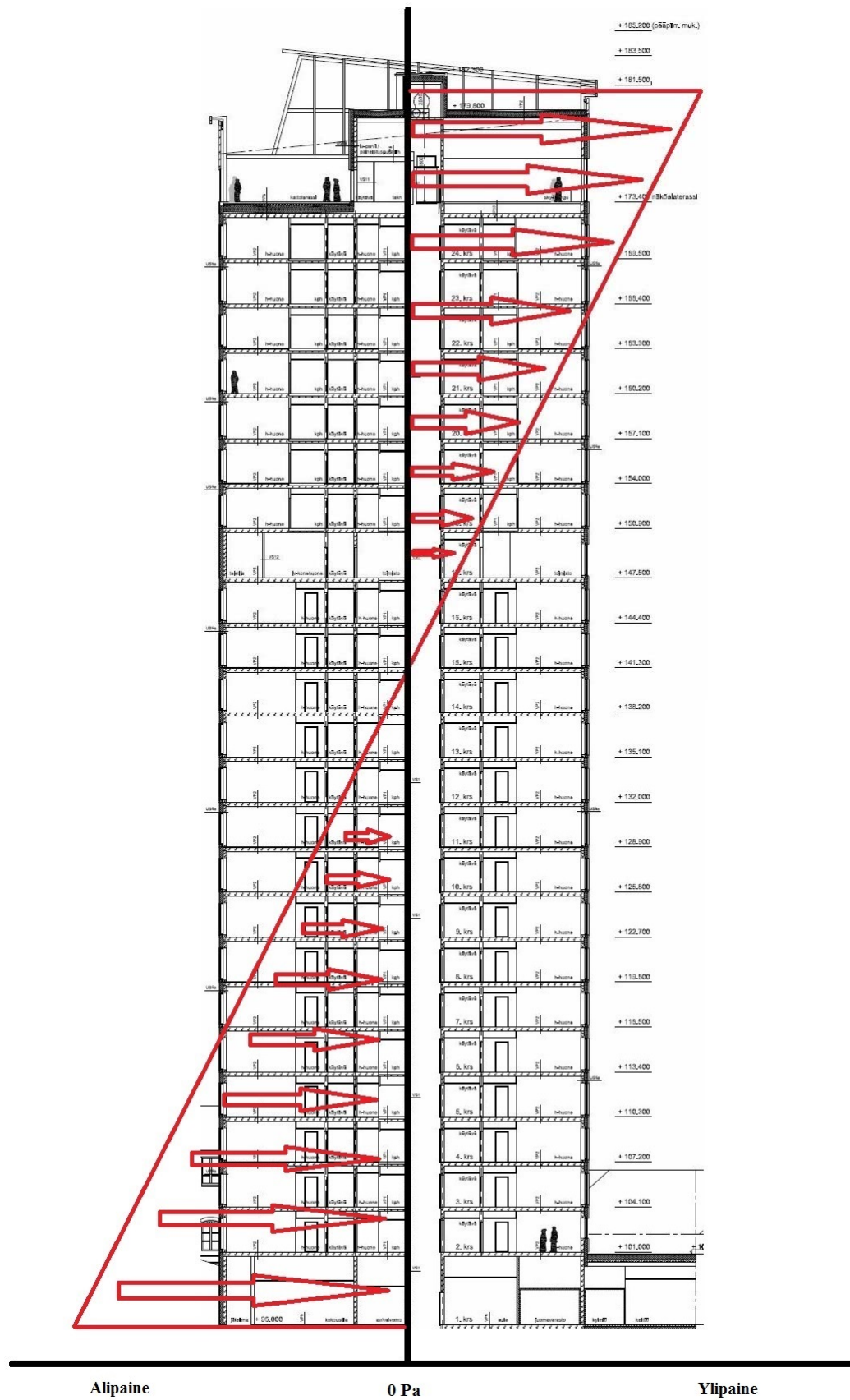
3.2 Oletukset

Tampereen tornihotelli sai MP-yhtymä Oy:n tiiviysmittauksista tiiviysluokitukseksi C:n arvolla $n_{50}=1,2$, mikä on hyvä tulos suurikokoiselta rakennukselta. Tornihotellin tiiviysmittaus tehtiin kuudessa eri kerroksessa. Saatujen kerroskohtaisten tiiviyslukemien perusteella voidaan olettaa rakennuksen olevan tasatiivis, koska kerrosten mitatuissa tiiviyslukemissa ei ole suuria vaihteluja. Tästä voidaan päätellä, että savupiippuvaikutuksen neutraaliakseli sijaitsee rakennuksen keskiosassa. Tällöin neutraaliakselin tulisi sijaita 14. kerroksen läheisyydessä, jos otetaan huomioon hotellin kaksi kellarikerrosta.

Kuvasta 7 näkee korkean rakennuksen oletetun painejakauman, kun rakennus on tasatiivis. Lisäksi kuvassa 8 on oma oletus tornihotellin painejakaumasta.



KUVA 7. Painejakauma korkeassa tasatiiviissä rakennuksessa (Siikanen 2014, muokattu).



KUVA 8. Oletettu tornihotellin painejakauma, jossa neutraaliakseli sijaitsee 14. kerroksen läheisyydessä.

Tornihotelli on 88,5m korkea. Ottaessa huomioon tuulen vertikaalisen nopeuden kasvamisen kaupunkialueella, jossa pinnan aerodynaamista karkeutta kuvaava rosoisuusparametri z_0 on noin 1,5m, tuulen nopeuden kasvu pitäisi olla merkittävä. Taulukossa 2 on muutamia rosoisuusparametriarvoja vertailukohteeksi.

TAULUKKO 2. Rosoisuusparametriarvoja z_0 kesä ja talviolosuhteissa. Peltojen ja merien tulokset poikkeavat talvella lumen ja jään takia (Suomen tuuliatlas 2015).

z_0 (m), kesä	z_0 (m), talvi	Maastotyyppi
1,5	1,5	Tiiviisti rakennetut asuin-alueet
1,4	1,4	Metsät
0,6	0,6	Väljästi rakennetut alueet
0,5	0,5	Satama-alueet
0,2	0,2	Kangasmaat
0,03	0,001	Pellot
0,0003	0,0007	Meri

Savupiippuvaikutuksen, ilmastoinnin ja tuulen aiheuttaman paineen yhteisvaikutus tekee tornihotellin paineprofiilista kuvan 6 mukaisen.

3.3 Tuuli laskennallisesti

Tuulen aiheuttamat paine-erot pystytään laskemaan kappaleessa 2 mainituilla kaavoilla 1,2 ja 3 Kaavoilla 1 ja 2 määritetään ensiksi tuulen nopeuden kasvu tornihotellin ylimmissä kerroksissa.

$$u_* = k \left(\frac{u(z)}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \right) \quad (1)$$

$$u_* = 0,4 \left(\frac{5 \frac{m}{s}}{\ln \left(\frac{10 m}{1,5 m} \right)} \right) \quad (1)$$

$$u_* = 1,0542 \frac{m}{s}$$

Esimerkkilaskussa 1 tuulen nopeuden ollessa 5m/s, on korkeuden z arvona käytetty 10 metriä. Tämä siksi, että säähavaintoasemat mittaavat tuulen nopeuksia tyypillisesti 10 metrin korkeudelta. Lisäksi z_0 :n rosoisuusparametrin arvona on käytetty 1,5 metriä, joka vastaa tiheästi rakennetun alueen rosoisuutta. Pintakitka u_* hidastaa ilmamassoja ilmakehän rajakerroksessa. Pintakitkan vaikutus heikkenee, mitä korkeammalle nouseaan.

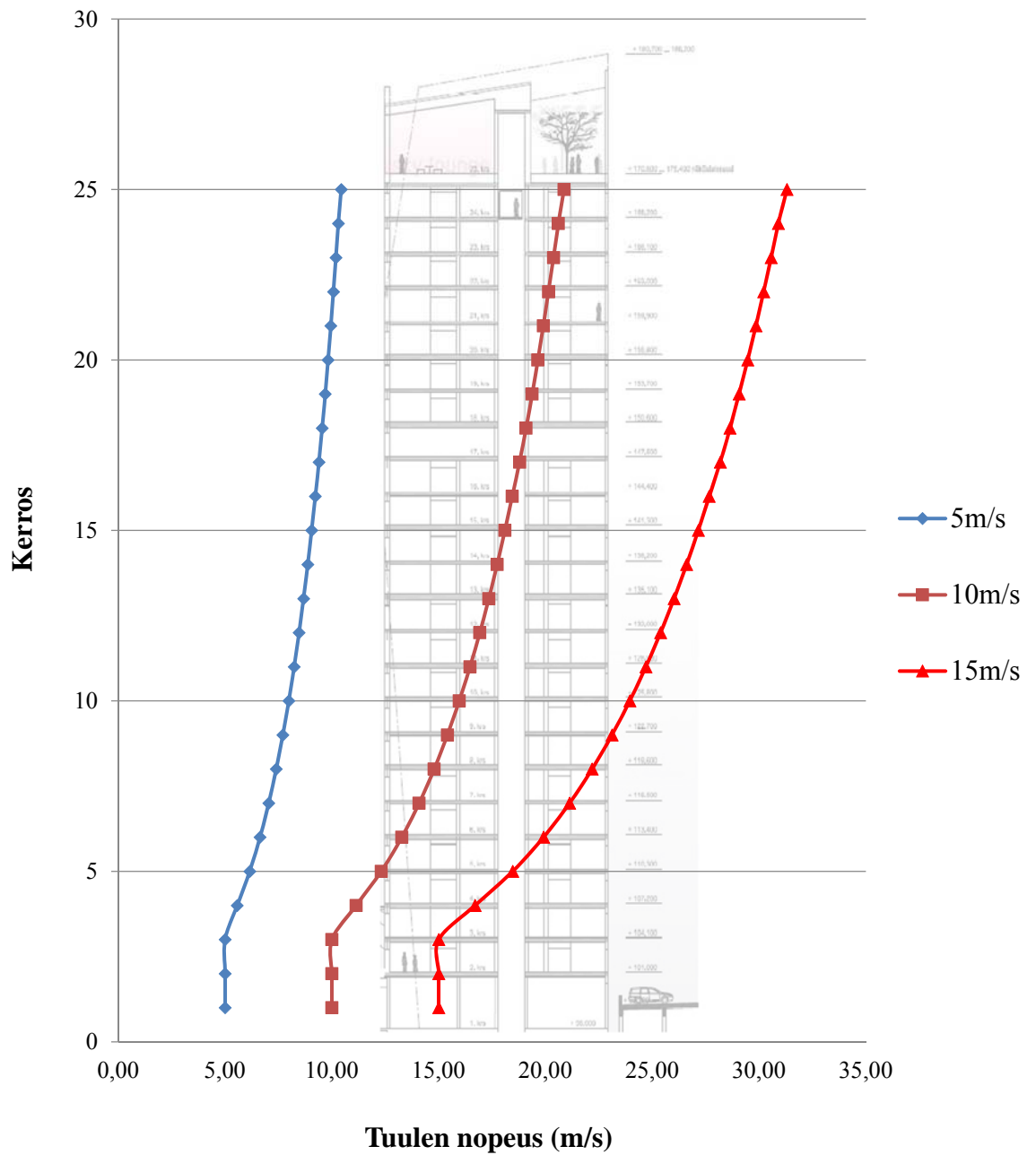
$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2)$$

$$u(z) = \frac{1,0542 \frac{m}{s}}{0,4} \ln \frac{78,6 m}{1,5 m} \quad (2)$$

$$u(z) = 10,4337 \approx 10,43 \frac{m}{s}$$

Esimerkkilaskussa 2 ratkaistaan kaavalla 1 lasketun kitkanopeuden avulla tuulen nopeus korkeudella $u(z)$, joka on tässä tapauksessa tornihotellin 25. kerroksen korkeus 78,6m. Tuulen nopeus kasvaa yli kaksinkertaiseksi. Kuvaajasta 1 näkee tuulen vertikaalisen kasvun 5m/s, 10m/s ja 15m/s tuulen nopeuksilla.

Tuulen vertikaalinen voimistuminen



KUVAAJA 1. Tuulen vertikaalinen voimistuminen kolmella eri tuulen nopeudella.

TAULUKKO 3. Tuulen lasketut nopeudet eri kerrokorkeuksilla tuulen mitatun nopeuden ollessa 5 m/s.

Kerros	korkeus z (m)	u(z) (m/s)
25	78,6	10,43
24	74,7	10,30
23	71,6	10,19
22	68,5	10,07
21	65,4	9,95
20	62,3	9,82
19	59,2	9,69
18	56,1	9,55
17	53	9,40
16	49,6	9,22
15	46,5	9,05
14	43,4	8,87
13	40,3	8,67
12	37,2	8,46
11	34,1	8,23
10	31	7,98
9	27,9	7,70
8	24,8	7,39
7	21,7	7,04
6	18,6	6,64
5	15,5	6,16
4	12,4	5,57
3	9,3	5,00
2	6,2	5,00
1	3,1	5,00

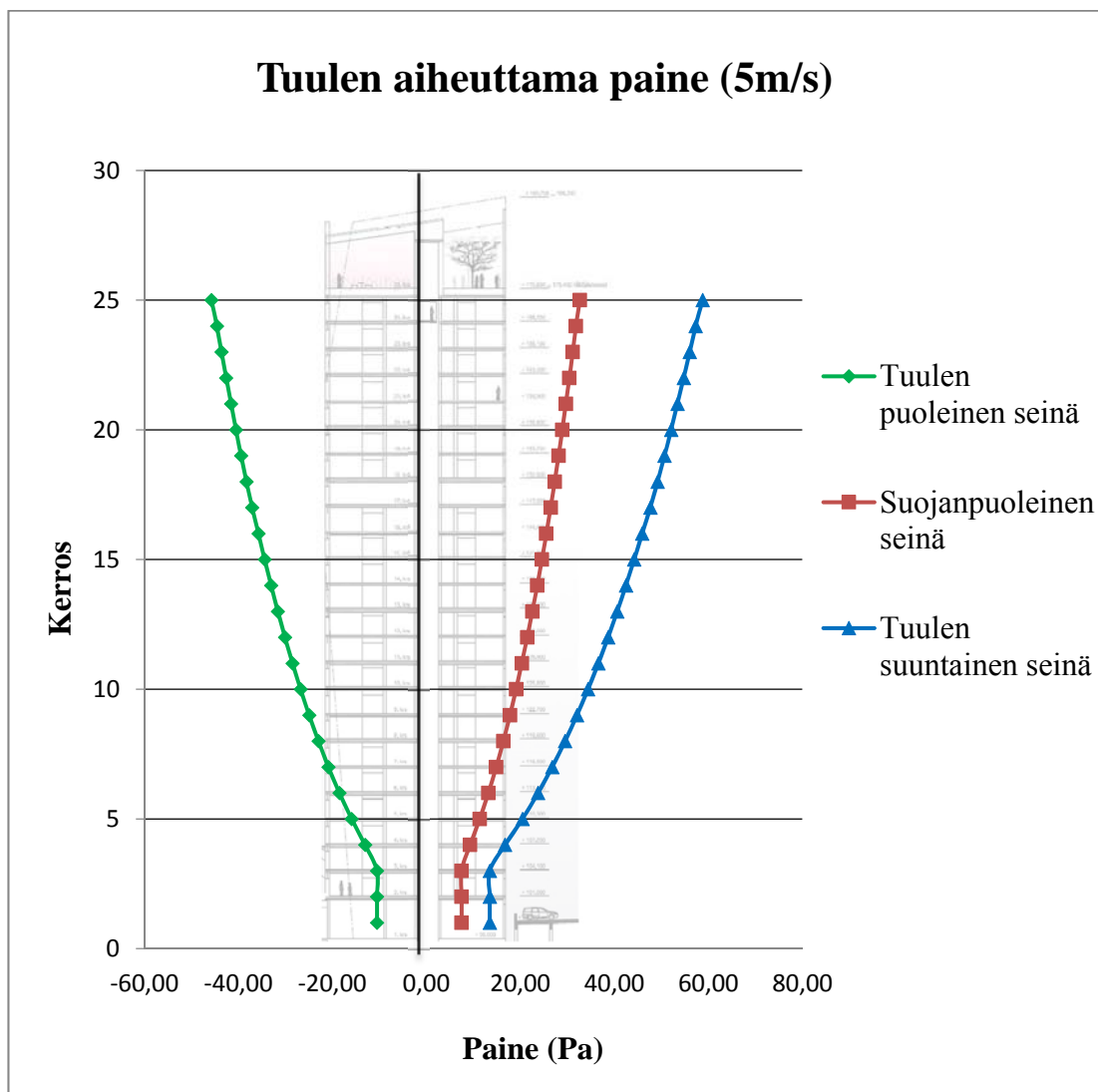
On huomioitava, että laskelmien kitkanopeus u_* on määritetty 10 metrin korkeudelta, jolloin logaritminen tuulen nopeuden kasvu alkaa vasta tämän jälkeen. Tämän takia taulukon 3 kolmen ensimmäisen kerroksen tulokset, jotka jäävät alle kymmenen metrin, ovat samoja. Kitkanopeus u_* pitää laskea jokaiselle tuulen nopeudelle erikseen.

Saaduilla vertikaalisen tuulen kasvun tuloksilla voidaan selvittää tuulen painevaikutus ulkoseiniin käyttämällä kaavaa 3. Esimerkkilaskussa on käytetty mitattua tuulen nopeutta 5 m/s.

$$p = \frac{1}{2} c \rho v^2 \quad (3)$$

$$p = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5^2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3)$$

$$p = 10,5 \text{ Pa}$$



KUVAAJA 2. Laskettu paineen vaikutus, kun on otettu huomioon tuulen vertikaalinen voimistuminen.

Kuvaajassa 2 on laskettu tuulen painevaikutus tornihotellin eri seinämillä tuulen suuntaan nähden. Laskuissa on käytetty kaavan kolme yhteydessä annettuja $c:n$ arvoja. Tuulen suuntaisen seinän c arvona on vaihtuvien lukemien takia ääripääarvoista laskettu keskiarvo 0,9. Tulokset ovat muutettu käänteiseksi, jotta ne vastaisivat ulkoseinän läpi mitattavaa paine-eroa.

TAULUKKO 4. Tuulensuuntaisen seinämän painelukemat kerroskohtaisesti tuulen ollessa 5 m/s

Kerros	korkeus (m)	$u(z)$ (m/s)	Paine (Pa)
25	78,6	10,43	-45,72
24	74,7	10,30	-44,56
23	71,6	10,19	-43,60
22	68,5	10,07	-42,60
21	65,4	9,95	-41,58
20	62,3	9,82	-40,51
19	59,2	9,69	-39,41
18	56,1	9,55	-38,27
17	53	9,40	-37,07
16	49,6	9,22	-35,71
15	46,5	9,05	-34,40
14	43,4	8,87	-33,03
13	40,3	8,67	-31,60
12	37,2	8,46	-30,08
11	34,1	8,23	-28,47
10	31	7,98	-26,76
9	27,9	7,70	-24,93
8	24,8	7,39	-22,96
7	21,7	7,04	-20,83
6	18,6	6,64	-18,49
5	15,5	6,16	-15,91
4	12,4	5,57	-13,02
3	9,3	5,00	-10,50
2	6,2	5,00	-10,50
1	3,1	5,00	-10,50

3.4 Savupiippuvaikutus laskennallisesti

Savupiippuvaikutuksen määrittämiseen on kaksi kaavaa. Kaavalla 4 saadaan laskettua hormin korkeuden sekä sisä- ja ulkoseinien välillä vallitsevan lämpötilaeron aiheuttama paine-ero ylä- ja alakerran välillä. Kaavalla 5 tarkastellaan paine-eroa ilman tiheyden sekä tarkasteltavan kerroksen ja oletetun neutraaliakselin välisen etäisyyden avulla. Tällöin pystytään huomioimaan savupiippuvaikutuksen aiheuttaman paine-eron tuottama kokonaiskuva, jolloin rakennuksen alaosissa vallitsee alipainetta ja yläosissa ylipainetta. Molemmissa esimerkkilaskuissa on käytetty ulkolämpötilana 0 °C, joka on lähellä Tampereen vuoden keskiarvoista lämpötilaa. Ulkolämpötilan ollessa 0 °C on myös helppo määrittää rakennuksen sisä- ja ulkopuolinen ilman lämpötilaero, joka on tässä tapauksessa $\Delta t = 22$ °C.

$$\Delta p = \left(\frac{T_s - T_u}{T_u} \right) \rho_s g h \quad (4)$$

$$\Delta p = \left(\frac{295,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}}{273,15 \text{ K}} \right) 1,196 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 78,6 \text{ m} \quad (4)$$

$$\Delta p = 74,28 \text{ Pa}$$

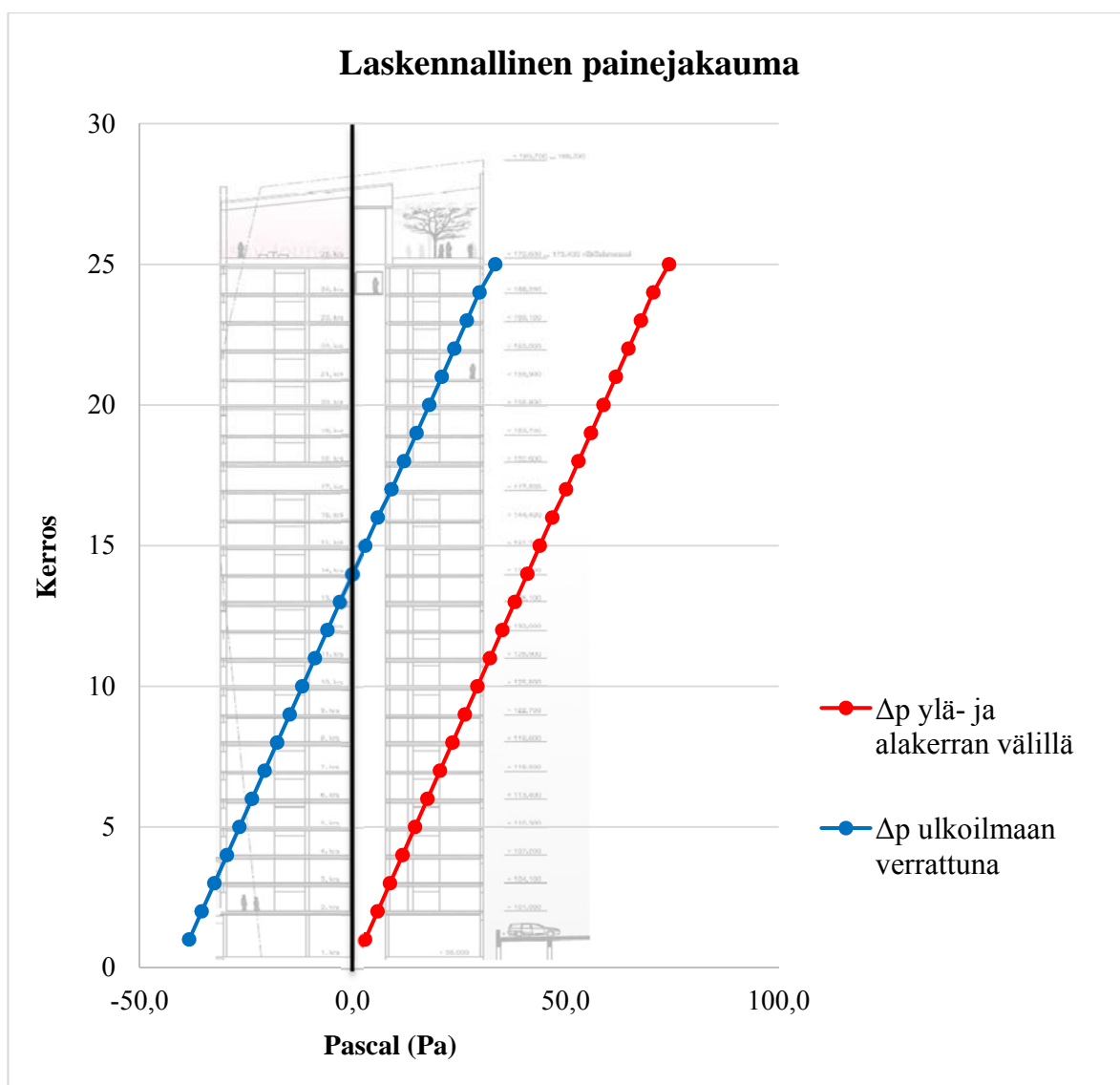
Kaavalla 4 laskettuna tornihotellin 25. kerroksessa vallitsee noin 74,3 pascalin ylipaine.

$$\Delta p = (\rho_u - \rho_s) h g \quad (5)$$

$$\Delta p = \left(1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1,196 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) 35,2 \text{ m} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (5)$$

$$\Delta p = 33,50 \text{ Pa}$$

Tulos on laskettu siten, että tornihotellin oletettu neutraaliakseli sijaitsee 14. kerroksessa, jolloin etäisyys 25. kerrokseen on 35,2 metriä. Kaavan 5 tulos on melkein puolet kaavan 4 tuloksesta. Laskemalla kerroskohtaisesti kaikki painearvot saadaan kuvaajan 3 mukainen paineprofiili.



KUVAAJA 3. Savupiippuvaikutuksen laskennalliset tulokset kahta eri menetelmää käyttäen.

Kuvaajasta 3 huomataan, että laskutavat antavat lähes samanmuotoisen paineprofiilin sillä eroavaisuudella, että kaavan 4 tulokset ovat noin 41 pascalia suuremmat. Kaavan 5 tulokset ovat enemmän todennukaisia, sillä sen tuottama paineprofiili muistuttaa oleuksissa esiintyvää kuvan 7 ja 8 paineprofiilia. Taulukkoihin 5 ja 6 on merkittynä molempien laskutapojen kerroskohtaiset arvot.

TAULUKKO 5. Laskettu paine-ero ylä- ja alakerran välillä.

Kerros	Kerroskorkeus (m)	Paine-ero (Pa)
25	78,6	74,28
24	74,7	70,59
23	71,6	67,66
22	68,5	64,73
21	65,4	61,80
20	62,3	58,87
19	59,2	55,94
18	56,1	53,01
17	53	50,08
16	49,6	46,87
15	46,5	43,94
14	43,4	41,01
13	40,3	38,08
12	37,2	35,15
11	34,1	32,22
10	31	29,29
9	27,9	26,36
8	24,8	23,44
7	21,7	20,51
6	18,6	17,58
5	15,5	14,65
4	12,4	11,72
3	9,3	8,79
2	6,2	5,86
1	3,1	2,93

TAULUKKO 6. Laskettu kerroskohtainen paine-ero verrattuna ulkoilmaan.

Kerros	Korkeus (m)	Etäisyys neutraaliakselista (m)	Paine-ero (Pa)
25	78,6	35,2	33,50
24	74,7	31,3	29,78
23	71,6	28,2	26,83
22	68,5	25,1	23,88
21	65,4	22	20,93
20	62,3	18,9	17,98
19	59,2	15,8	15,03
18	56,1	12,7	12,08
17	53	9,6	9,14
16	49,6	6,2	5,90
15	46,5	3,1	2,95
14	43,4	0	0
13	40,3	-3,1	-2,95
12	37,2	-6,2	-5,90
11	34,1	-9,3	-8,85
10	31	-12,4	-11,80
9	27,9	-15,5	-14,75
8	24,8	-18,6	-17,70
7	21,7	-21,7	-20,65
6	18,6	-24,8	-23,60
5	15,5	-27,9	-26,55
4	12,4	-31	-29,50
3	9,3	-34,1	-32,45
2	6,2	-37,2	-35,40
1	3,1	-40,3	-38,35

3.5 Mittaukset

Mittauksilla saadaan todennettua millaiset paineolosuhteet rakennuksessa todellisuudessa vallitsee. Vertaamalla mitattuja tuloksia laskettuihin arvoihin pystytään tarkastelemaan niiden paikkansapitävyyttä. Tuloksien vertaaminen on tärkeää, jotta saataisiin lisää ymmärrystä ja tietoa rakennuksen painesuhteiden selvittämiseen.

Painesuhdeselvityksessä on hyvä mitata paine-erot ulkoilmaan verrattuna usealta eri kerrokselta pääilmansuuntien seiniltä. Näin jokaiselle kerrokselle tulisi noin neljä mitausta, joilla pystyttäisiin eliminoimaan ulkona vallitsevan tuulen aiheuttama paine. Mit-

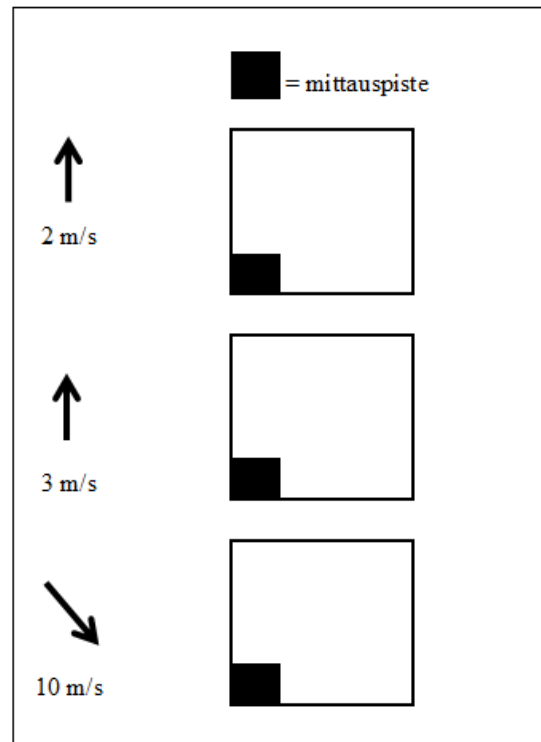
tauksissa olisi myös hyvä olla tuulimittaukset paikanpäältä, jotta tuulen vaikutuksen pystyisi eristämään erillistä tarkastelua varten. Tämä painesuhdeselvitys ei tarkastele tuulen vaikutuksia perinpohjaisesti, sillä se vaatisi erillisen sääaseman tornihotellin läheisyyteen keräämään tarkkoja tuulitietoja vallitsevista tuulioloista.

3.5.1 Mittaustapa ja havainnot

Painemittauksia suoritettiin kahdella tavalla. Kolme pistokoemaista mittausta tehtiin Swema 3000 paine-eromittarilla, jolla mitattiin paine ero ulkoseinän läpi käyttämällä hätäpoistumistien ovea. Pistokoemittauksia tehtiin kerroksissa 3,8,18 ja 24. Samalla mitattiin käytävällä sijaitsevan poistoilman ilmamäärä, jotta nähtäisiin paine-erojen vaihtelun merkitys ilmanvaihtoon. Mittauksissa pyrittiin saamaan mahdollisimman paljon toisistaan eriävät ulkoilmaolosuhteet, jotta nähtäisiin niiden vaikutuksien vaihtelut. Kuvassa 9 on kuvattuna mittaustapa hätäpoistumistien läpi käyttämällä Swema 3000 paine-eromittaria. Mittarissa käytettiin jäykkää ilmaletkua, jottei ovi litistäisi sitä mittausta tehdessä. Mittaustuloksia otettiin minuutin ajalta viisi kappaletta kymmenen sekunnin välein ja näistä tuloksista laskettiin keskiarvo. Kuvasta 10 näkee hätäpoistumistien sijainnin tornissa sekä mittauskerroilla vallitsevat tuuliolot.



KUVA 9. Paine-ero mittaus kolmannen kerroksen hätäpoistumistien läpi



KUVA 10. Kolmen mittauskerran sijainti sekä mittauskertojen aikainen tuulen nopeus ja suunta

Toisena mittaustapana käytettiin kiinteistöautomaatioon liitettyjä paine-eromittareita, jotka ovat sijoitettuna kerroksiin 3,8,13,18 ja 24. Automaatio tallentaa kerroksien painelukemat länsiseinältä ikkunan karmin läpi vartin välein. Mittauspisteen ikkuna on yhteydessä samaan käytävään mitä hätäpoistumistie. Automaation keräämää dataa saatiin noin kahden ja puolen kuukauden ajalta.

Mittauksia tehdessä hotelli oli normaalissa käytössä eikä mittauksia varten tehty mitään erityistoimenpiteitä hotellin järjestelmiin. Pistokoemittauksia tehtäessä havaittiin hissi-aulassa korkeaa vihellystä, joka oli vielä voimakkaampaa, kun ulkona vallitsi 10 m/s tuuli. Lisäksi pääsisäänkäynnin tuulikaapissa kuului suhinaa. Molemmat ilmiöt johtuvat oletettavasti alakertaan syntyneestä alipaineesta. Hätäpoistumistien viereisen käytävän tuloilman päätelaite piti myös voimakkuudeltaan vaihtelevaa huminaa, jonka havaitsi jälleen paremmin tuulen ollessa 10 m/s.

3.5.2 Pistokoemittaukset

Tässä osiossa käsitellään kolmen mittauksen tuloksia ja tarkastellaan niistä saatavia paineprofiileja. Taulukossa 7 on kolmen pistokoemittauksen mittauspöytäkirja, josta näkee paine-eron ulkoseinän läpi sekä sisä- ja ulkoilman lämpötilat ja mittauksenaikaiset tuuliolosuhteet. Lisäksi taulukosta 8 näkee pistokoemittauksien ohessa mitattujen käytävien ilmamäärät ja niiden suunnitellut arvot. Suunniteltujen- ja mitattujen arvojen erotuksesta huomataan, että tuloksien erotus kasvaa mitä alipaineisempi tornihotelli on.

TAULUKKO 7. Pistokoemittauksista saadut paine-eromittausten tulokset.

24.2.2015	Kerros	Pa	T _s	T _u	Tuuli
	3	-28,7	22°C	1°C	2m/s, etelän suunnasta
	8	-7,3	22°C	1°C	2m/s, etelän suunnasta
	18	21,3	22°C	1°C	2m/s, etelän suunnasta
	24	41,3	22°C	1°C	2m/s, etelän suunnasta

1.4.2015	Kerros	Pa	T _s	T _u	Tuuli
	3	-33,3	22°C	1°C	3m/s, etelän suunnasta
	8	-18,7	22°C	1°C	3m/s, etelän suunnasta
	18	11,5	22°C	1°C	3m/s, etelän suunnasta
	24	26,6	22°C	1°C	3m/s, etelän suunnasta

8.4.2015	Kerros	Pa	T _s	T _u	Tuuli
	3	-55,6	22°C	6°C	10m/s luoteen suunnasta
	8	-45	22°C	6°C	10m/s luoteen suunnasta
	18	-2,3	22°C	6°C	10m/s luoteen suunnasta
	24	24,5	22°C	6°C	10m/s luoteen suunnasta

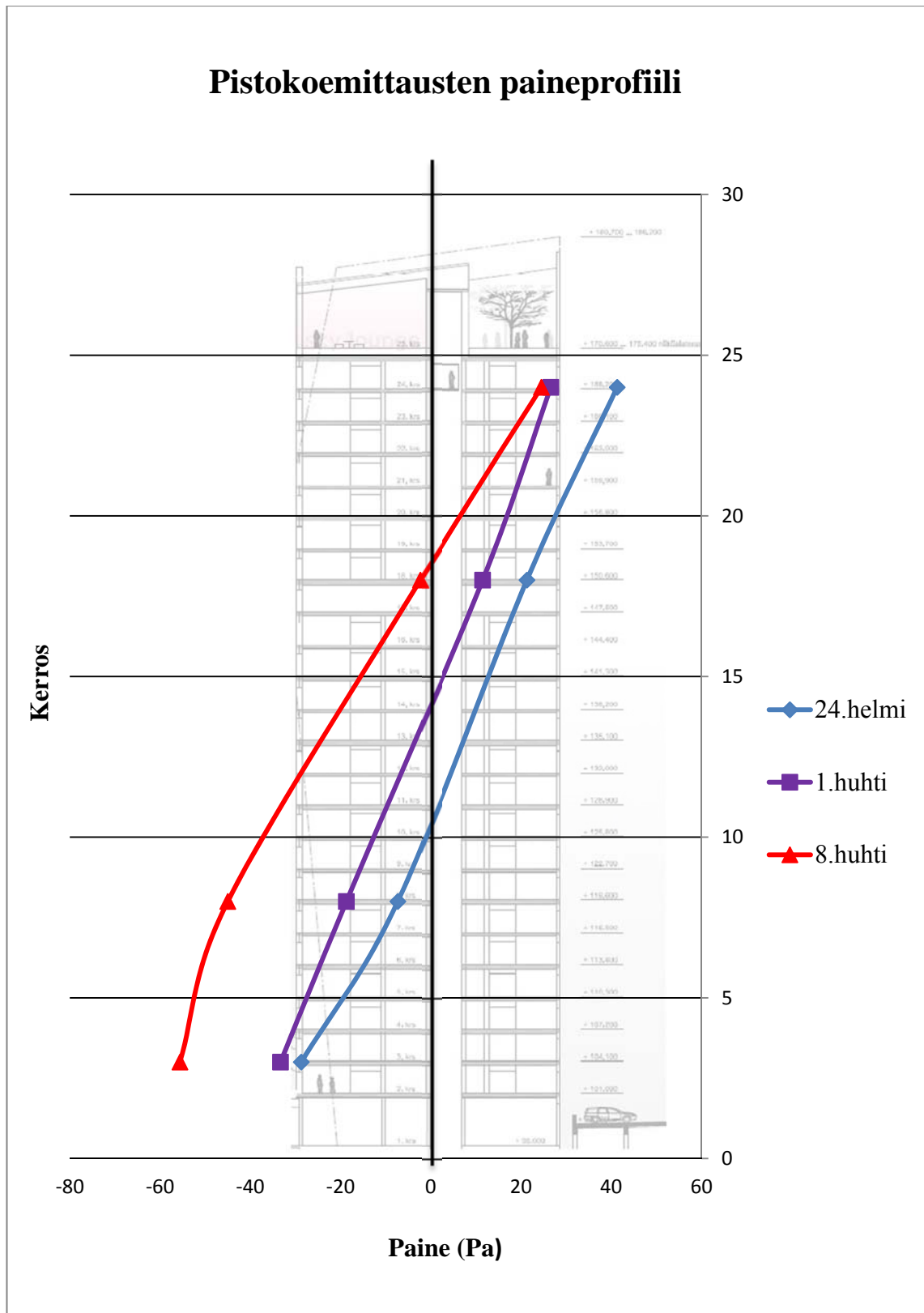
TAULUKKO 8. Pistokoemittauksista saadut käytävän ilmanvaihdon mittaukset.

24.2.2015	Kerros	Mitattu (l/s)	Suunniteltu (l/s)	Erotus (l/s)
	3	65,39	70	-4,61
	8	62,35	70	-7,65
	18	67,69	70	-2,31
	24	72,26	70	2,26

1.4.2015	Kerros	Mitattu (l/s)	Suunniteltu (l/s)	Erotus (l/s)
	3	65,58	70	-4,42
	8	64,83	70	-5,17
	18	69,13	70	-0,87
	24	72,22	70	2,22

8.4.2015	Kerros	Mitattu (l/s)	Suunniteltu (l/s)	Erotus (l/s)
	3	65,29	70	-4,71
	8	64,05	70	-5,95
	18	72,93	70	2,93
	24	74,18	70	4,18

Taulukon 7 tuloksista saadaan kuvaajan 4 mukaisia painekäyriä. Kuvaajasta nähdään, että tornihotellin paineprofiili muistuttaa paljon oletuksissa esiintynyttä paineprofiilia.

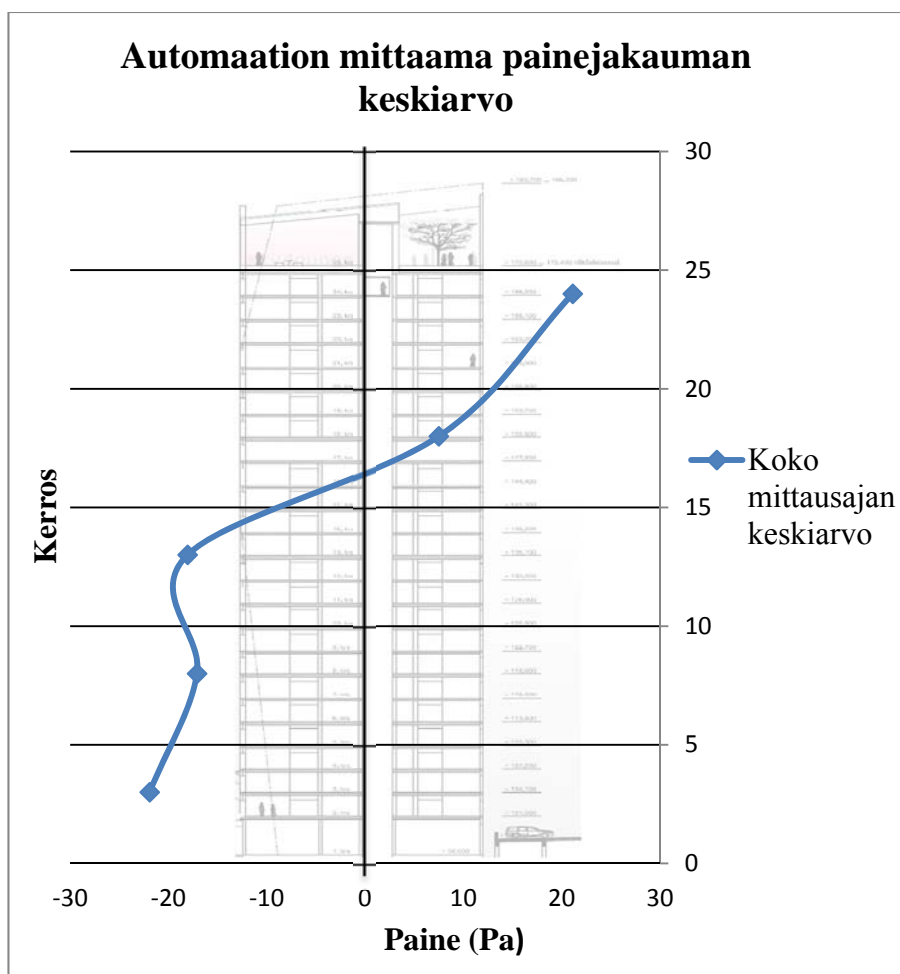


KUVAAJA 4. Pistokoemittausten tuloksista piirretty paineprofiili.

Pistokoemittauksen painekuvaajasta huomataan, että neutraaliakselin paikka vaihtelee paljon. Ensimmäisen ja toisen mittauskerran mittausolosuhteet eroavat vain ainoastaan tuulen osalta 1 m/s toisistaan, mutta silti tuloksissa on noin 10 pascalin paine-ero. Kolmannen mittauskerran huomattavasti alipaineinen tulos ei tule yllätyksenä, sillä mitaushetkellä vallitsi voimakas luoteistuuli. Yleisesti pistokokeen mittauksista saa selville tornihotellin suuntaa antavan painejakauman sekä osviittaa tuulen vaikutuksen merkityksestä.

3.5.3 Kiinteistöautomaation mittaukset

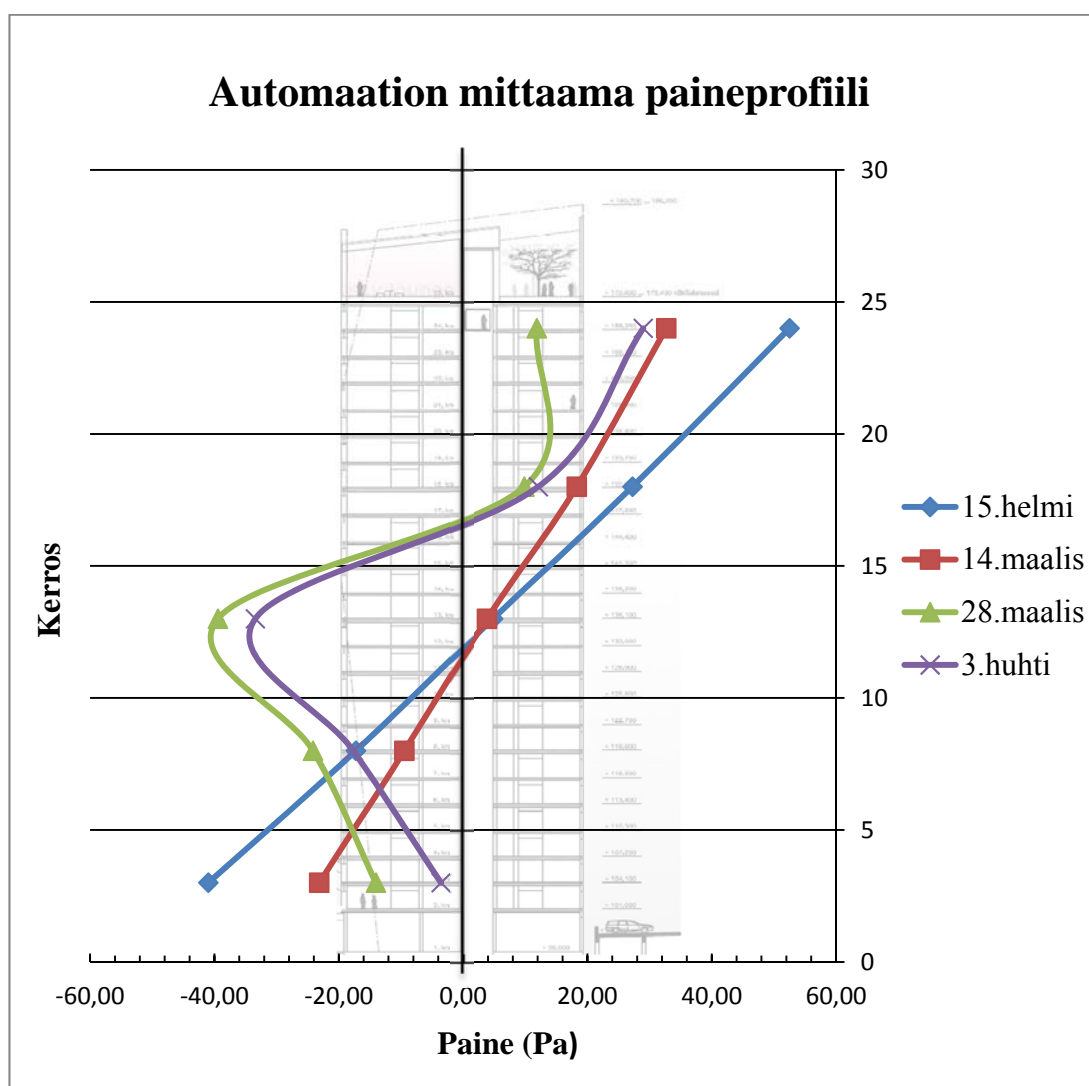
SRV:n asennuttamat painemittarit ovat kytketty Siemensin kiinteistöautomaatiovalvomoon ja ne ovat kirjanneet painearvoja viikosta 6 eteenpäin. Mitatuista tuloksista valittiin muutamia mittausajanjaksoja olosuhteiden mukaan. Kuvaajassa 5 on kaikkien mitausarvojen keskiarvoilla piirretty painekäyrä. Ulkolämpötilat vaihtelivat mittausajanjakson aikana $-12,7^{\circ}\text{C} \dots +15,1^{\circ}\text{C}$ välillä.



KUVAAJA 5. Mittaustulosten keskiarvot ajanjaksolta 8.2 - 17.4.2015

Mittausajanjaksolla painelukemat vaihtelivat hyvin paljon todennäköisesti tuulen vaikutuksen takia. Ikkunan karmeihin asennetut mittarit eivät saa tuulensuojaa ja ovat siten alttiita tuulen painevaikutuksille. Kerroksien 10–15 välillä on huomattava poikkeama mittaustuloksissa. Tämä voi johtua siitä, että näiden kerroksien välillä on jokin vuotoaukko tai siitä, että kerroksen 13 painelukemat ovat virheellisiä. Pistokoemittauksissa ei mitattu tuloksia kerroksien 10–15 väliltä, joten emme voi todentaa 13 kerroksen mitausvirhettä.

Kuvaajassa 6 on valittu automaation keräämiä painelukemia ajanjaksoilta, jolloin tuulisuus on ollut vähäistä, koska käytössä ei ollut muita mittausmenetelmällisiä keinoja eliminoida tuulen painevaikutuksia.



KUVAAJA 6. Vähätuulisten ajanjaksojen painekäyrät.

Kuvaajan 6 painekäyrien pisteet ovat kahden tunnin aikana saaduista painelukemista laskettuja keskiarvoja. Tulokset on poimittu samalta ajanjaksolta, joka on 11:00–13:00 väliltä. Mittaustuloksissa esiintyy kahdenlaisia painekäyriä. 15.2 ja 14.3 saadut tulokset ovat hyvin suoraviivaisia ja ne kuvaavat selkeästi savupiippuvaikutusta. Neutraaliakselit täsmäävät molemmilla painekäyrillä, vaikka kahden ensimmäisen mittausajanjakson ulkoilmalämpötilaolot eroavat toisistaan noin 12 °C. Kahden ensimmäisen painekäyrän mukaan neutraaliakseli sijaitsisi kerrosten 12–13 välillä, mikä ei ole kaukana oletetusta 14 kerroksesta. Taulukossa 9 on merkittynä kuvaajan 6 painelukemat sekä mittauksen aikainen ulkolämpötila.

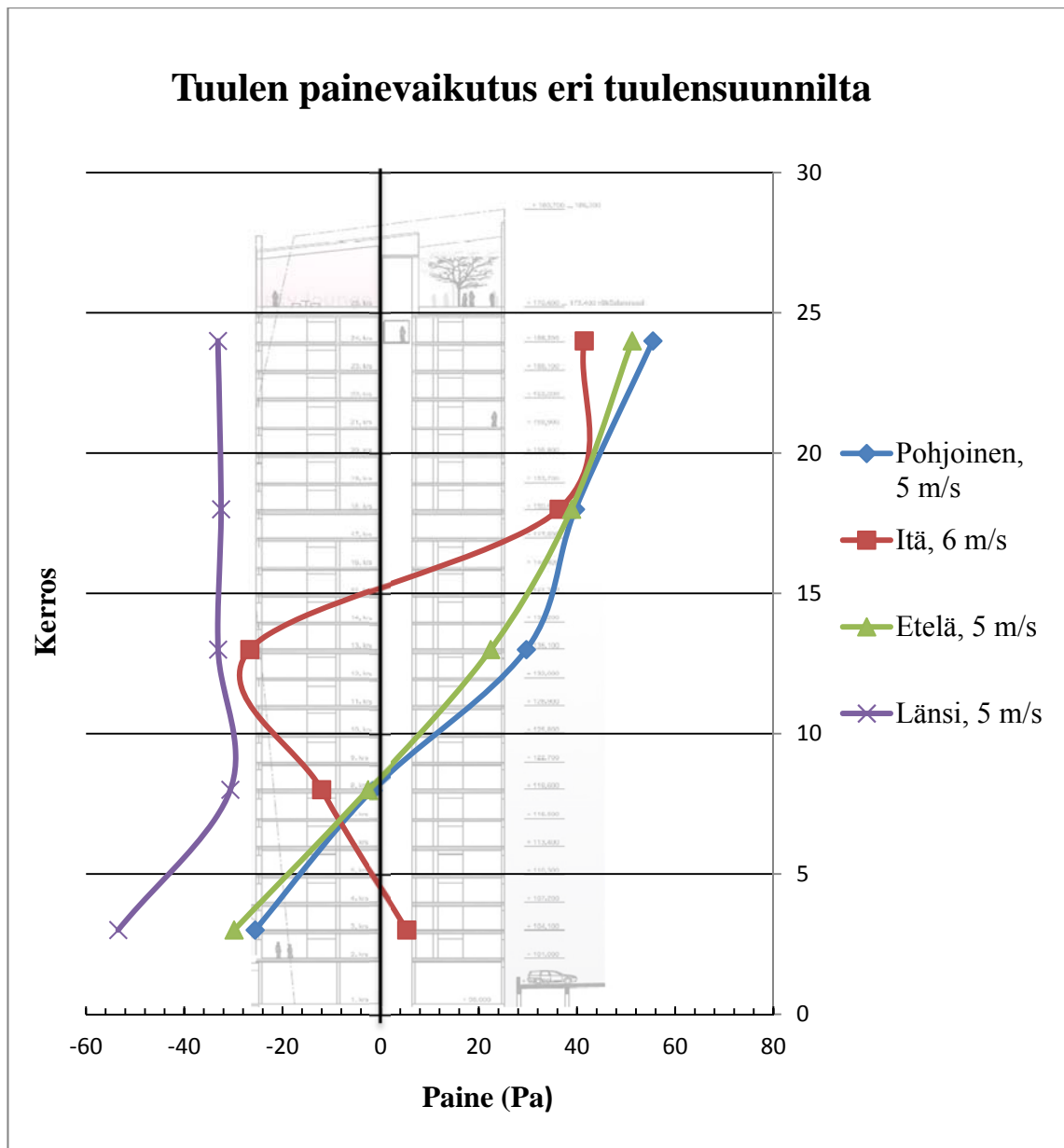
28.3 ja 3.4 mittausjaksot muistuttavat hyvin paljon toisiaan, mutta ne poikkeavat hyvin paljon kahteen ensimmäiseen mittausjaksoon verrattuna. Kahdessa jälkimmäisessä painekäyrässä esiintyy samankaltainen poikkeama, joka näkyy myös koko mittausajanjakson keskiarvillisessa painekäyrässä (katso kuvaaja 5). Näistä kolmesta painekäyrästä voidaan todeta että, jokin aiheuttaa tornihotellin neutraaliakselin läheisyyteen suuren alipaineen, joka siirtää neutraaliakselin 16. kerrokseen, teknisen kerroksen läheisyyteen.

TAULUKKO 9. Kiinteistöautomaation mittaamien tulosten keskiarvot kello 11:00–13:00 väliltä, jolloin ulkona vallitseva tuuli on 2 m/s tai vähemmän.

Kerros	3	8	13	18	24	T _u
	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	°C
15.helmi	-40,99	-17,24	4,82	27,24	52,50	-10,01
14.maalis	-23,15	-9,45	3,83	18,29	32,68	2,02
28.maalis	-14,04	-24,15	-39,45	9,83	11,85	1,92
3.huhti	-3,55	-17,66	-33,43	12,1	28,98	3,25

3.5.4 Tuulen vaikutus

Tarkastellaan tuulen vaikutusta tornihotellin painesuhteisiin ottamalla kiinteistöautomaation mittaamat tulokset tuulisilta ajanjaksoilta ja tekemällä kuvaajan 6 mukainen paineprofiili. Kuvaajaan 7 valittiin kahden tunnin keskiarvot automaation mittaamista tuloksista. Jokainen painekäyrä edustaa eri ilmansuunnasta puhaltavan tuulen vaikutusta. Näin saadaan todennettua painevaikutukset eri ulkoseinille. Tähän painesuhdeselvitykseen ei saatu tarkkoja tuulitietoja mittausajanjaksolta, mutta WindGURU sivustolta saadaan suuntaa antavia tuulitietoja tuulen voimakkuuksien ja suuntien määrittämiseen.



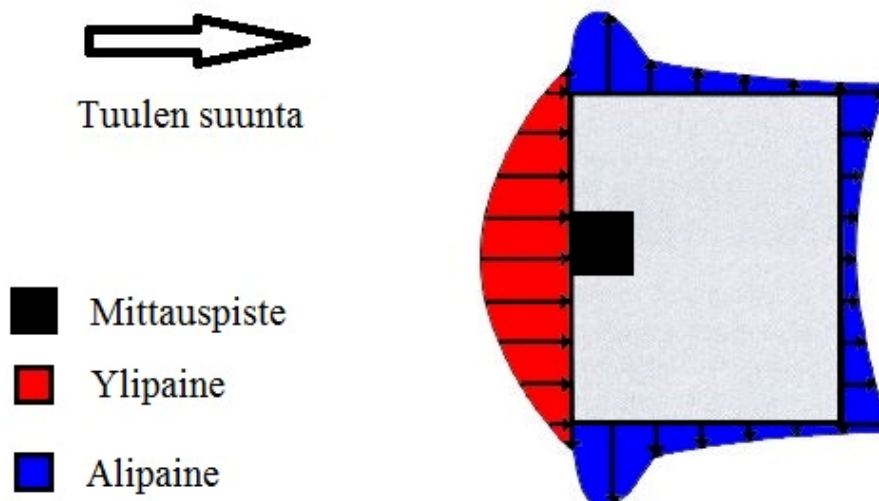
KUVAAJA 7. Tuulisten ajanjaksojen painekäyrät neljältä pääilmansuunnalta.

Kuvaajasta 7 nähdään selvästi tuulen suunnan vaikutus mittauksiin, kun mittauspisteet sijaitsevat läntisellä ulkoseinällä. Kaikkien ilmansuuntien edustamat painekäyrät noudattavat kuvan 2 painejakaumaa rakennuksen ulkoseinillä. Itäinen tuuli tekee kuitenkin poikkeuksen, sillä sen painekäyrä muistuttaa kuvaajan 6 kahden jälkimmäisen painekäyrän tuloksia. Tuulen aiheuttamien paine-erojen osalta on turha arvioida neutraaliakselin sijaintia, sillä tuulen suunta vaikuttaa liikaa mittaustuloksiin. Taulukossa 10 on merkittynä kuvaajan 7 paine- sekä lämpötilalukemat. Paineikäyrien ulkolämpötiloissa on vähän vaihtelua, joten tuulen vaikutuksen painekäyrät ovat toisiinsa vertailukelpoisia.

TAULUKKO 10. Mittaustulokset eri tuulensuunnilta vallitsevilta ajanjaksoilta.

Tuulen suunta ja voimakkuus	Kerros					T_u °C
	3	8	13	18	24	
	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	
Pohjoinen, 5 m/s	-25,57	-1,67	29,68	39,67	55,44	0,81
Itä, 6 m/s	5,31	-12,01	-26,63	36,35	41,48	0,42
Etelä, 5 m/s	-29,84	-2,55	22,41	38,87	51,23	0,58
Länsi, 5 m/s	-53,45	-30,6	-33,09	-32,5	-33,12	2,59

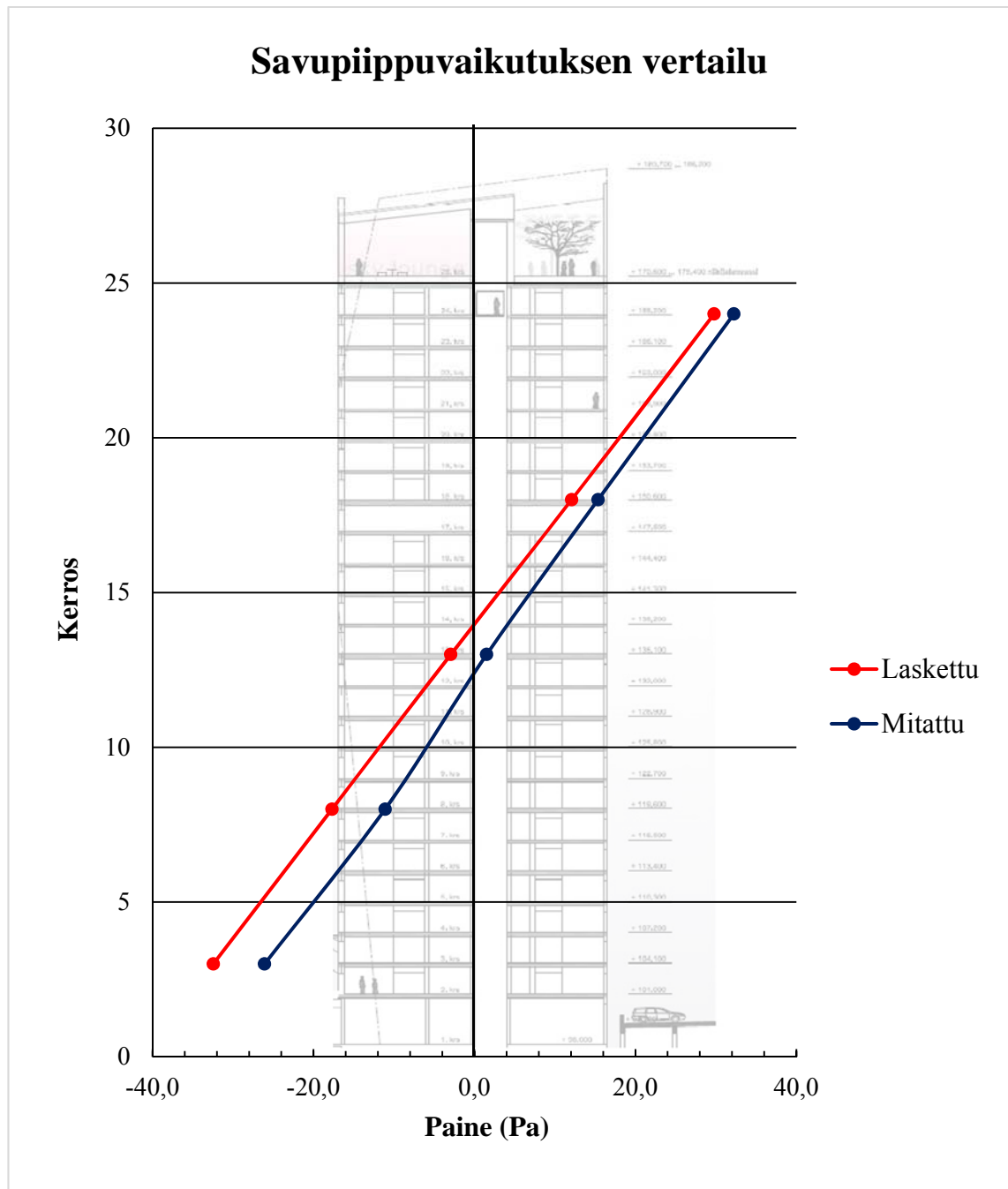
Kuvaajan 7 läntisen tuulen tuottamasta painekäyrästä voidaan huomata alipaineen kumoavan kokonaan savupiippuvaikutuksen ylipaineen yläkerrasta, koska painekäyrällä ei ole lainkaan neutraaliakselia. Tämä voi johtua siitä, että tuulen suunnan vaikutus paine-eromittariin on liian suuri. Kuvassa 11 on esimerkkutilanne läntisen tuulen vaikutuksesta tornihotellin ulkoseinille. On huomioitava, että paine-eromittarin mittaama tulos on käänteinen kuvan esimerkkiin nähden, sillä paine-eromittaus tehdään sisältäpäin ulkoseinän läpi. Ylipaine läntisellä ulkoseinällä tuottaa alipaineen rakennuksen läntiselle sisäseinälle.



KUVA 11. Esimerkki läntisen tuulen vaikutuksesta rakennuksen ulkoseinillä (Siikanen 2014, muokattu).

3.6 Tuloksien tarkastelu ja vertailu

Tässä osiossa verrataan laskettuja ja mitattuja paineprofiileja. Kuvaajassa 8 verrataan savupiippuvaikutuksen laskettua ja mitattua paineprofiilia. Mitatut tulokset ovat valittu vastaamaan laskettujen tulosten lähtötietoja automaation tallentamista paine-eromittauksista, kun ulkoilman lämpötila on 0 °C ja tuulisuus on lähes täysin tyyntä.

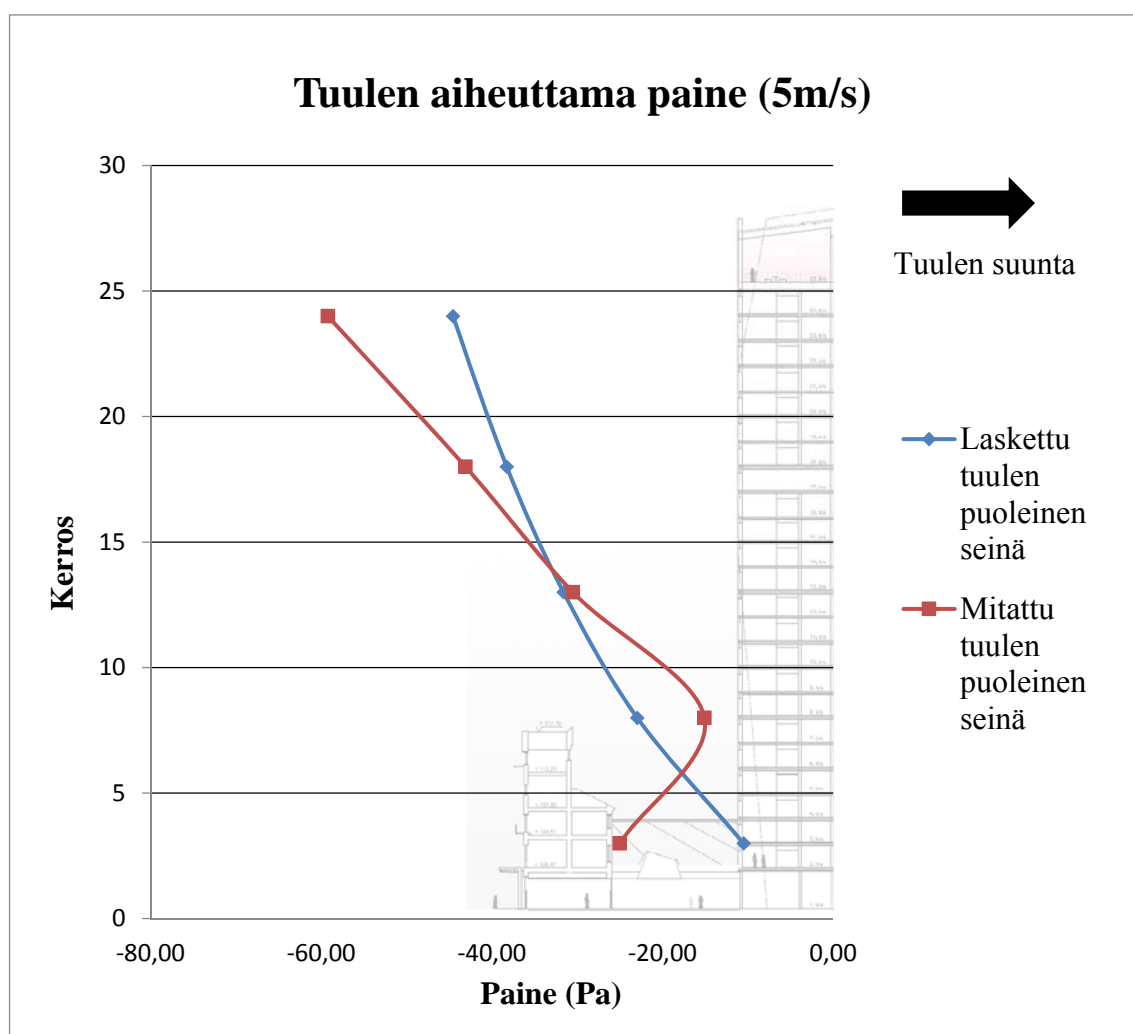


KUVAAJA 8. Lasketun ja mitatun savupiippuvaikutuksen painekäyrät.

Kuvaajasta 8 nähdään, että lasketun ja mitatun paineprofiilin painekäyrät ovat lähes samanlaiset. Savupiippuvaikutuksen lasketuissa arvoissa oli oletuksena, että neutraaliakseli sijaitsisi 14. kerroksessa. Tulos on lähellä laskettuja arvoja, sillä savupiippuvai-
kutuksen mitatuilla tuloksilla neutraaliakseli sijaitsee 13. kerroksessa.

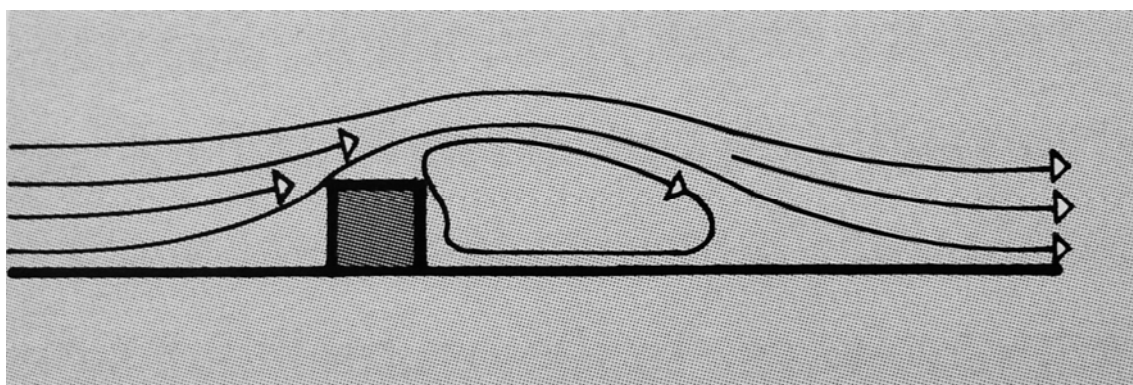
TAULUKKO 11. Kuvaajassa 8 esiintyvät lasketut ja mitatut tulokset ulkoilman lämpö-
tilan ollessa 0 °C ja tuulisuuden 1m/s.

Laskettu		Mitattu 2.3.2015, klo 3:00		Erotus
Kerros	Pa	Kerros	Pa	Pa
24	29,78	24	32,24	2,46
18	12,08	18	15,36	3,28
13	-2,95	13	1,52	4,47
8	-17,70	8	-11,10	6,60
3	-32,45	3	-26,08	6,37

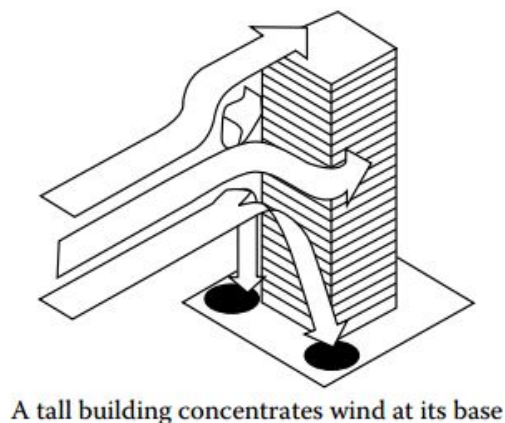
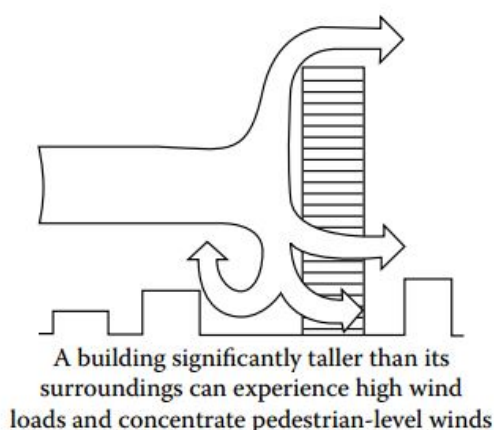


KUVAAJA 9. Tuulenpuoleiselle seinälle laskettu ja mitattu painevaikutus.

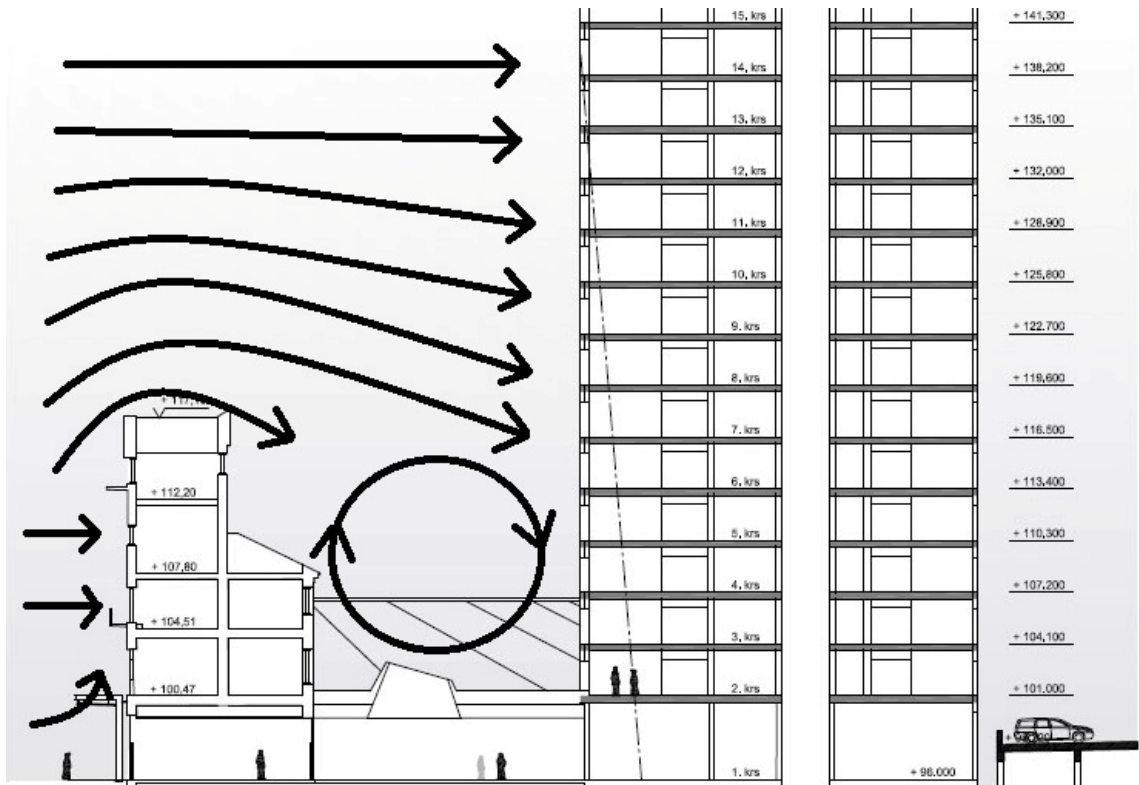
Kuvaajasta 9 näkee lasketun ja mitatun tuulen vaikutuksen eron paineprofiileissa, kun tuulen nopeus on 5 m/s ja ulkolämpötila 2,59 °C. Mitatut tulokset ovat otettu kuvaajan 7 länsituulen tuloksista, joista on vähennetty savupiippuvaikutuksen aiheuttama painevaikutus. Molemmissa painekäyrissä löytyy alipaineen kasvua, mitä korkeammalle nouseaan. Painevaikutuksen kasvu pystytään perustelemaan tuulen vertikaalisella nopeuden kasvulla, mitä käsiteltiin kappaleessa 2.1. Mitattujen arvojen mukaan tuulen painevaikutus on laskettuja tuloksia suurempi. Lisäksi kolmannen kerroksen mittaustulos poikkeaa reilusti muuten tasaisesti laskevasta painekäyrästä. Tämä poikkeavuus voi johtua tornihotellin länsipuolella sijaitsevan vanhan vesitornin aiheuttamista pyörteistä tai tuulen ohjautumisesta korkeaa tornihotellia pitkin. Kuvissa 12 ja 13 ovat esimerkit tuulen käyttäytymisestä rakennuksen ympärillä ja kuvaan 14 on mallinnettu tornihotellin mahdollinen tuulikäyttäytyminen.



KUVA 12. Tuulen käyttäytyminen rakennuksen ympärillä (Siikanen 2014).

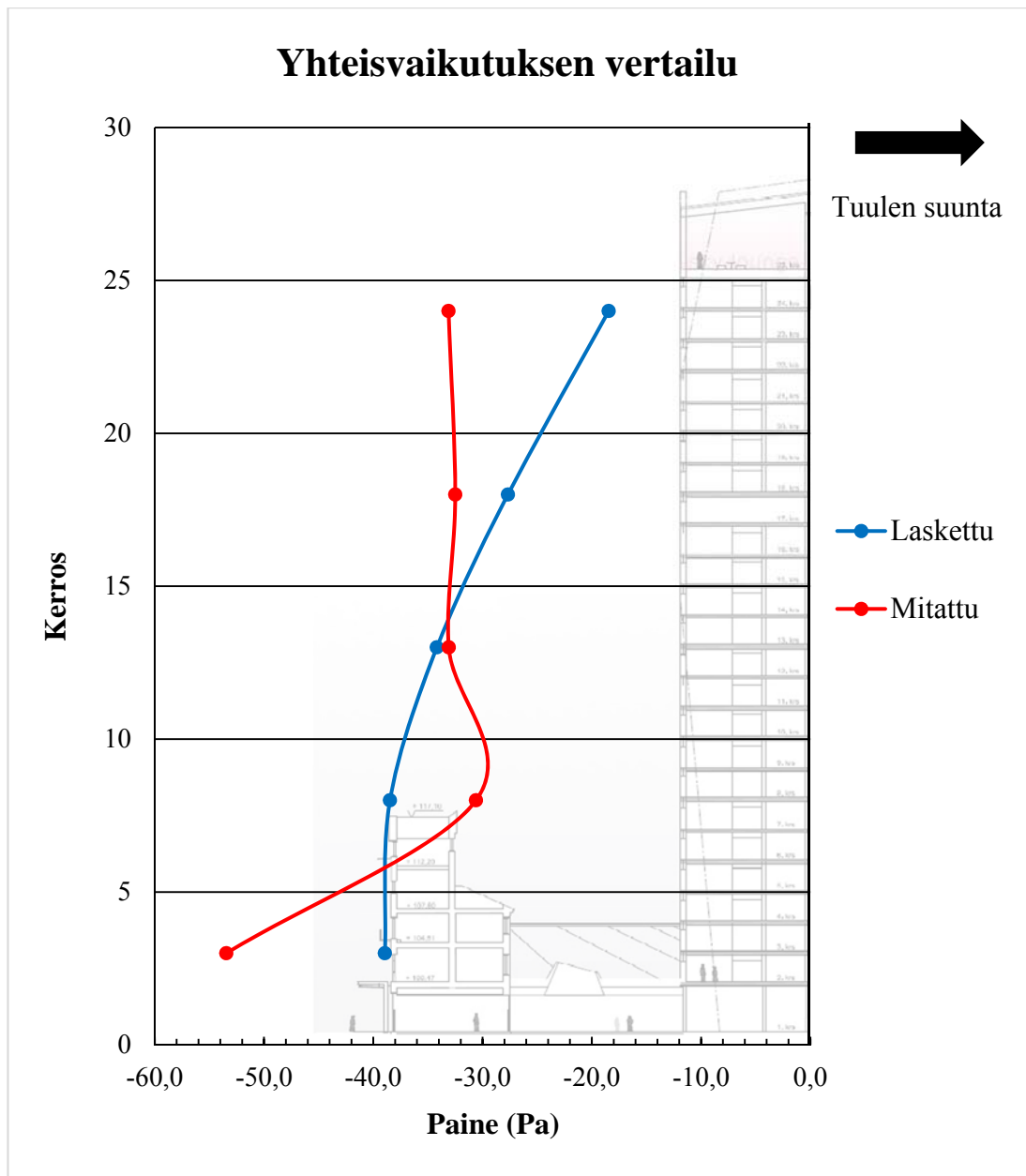


KUVA 13. Tuulen käyttäytyminen korkean rakennuksen ympärillä (Tanarath 2010).



KUVA 14. Länsituulen oletettu käyttäytyminen tornihotellin juurella.

Kuvan 14 mukainen pyörteisyys tornihotellin juurella selittäisi kolmannen kerroksen mittaustuloksen poikkeaman.



KUVAAJA 10. Savupiippu- ja tuulen vaikutuksen yhteisvaikutukset laskettuna ja mitattuna.

Kuvaajassa 10 on savupiippuvaikutuksen sekä tuulen vaikutuksen yhteisvaikutukset laskennallisesti ja mittaamalla selvitettyinä, kun lännestä tuulee 5 m/s ja ulkolämpötila on 2,59 °C. Lasketut tulokset ovat korjattu vastaamaan mitattujen tulosten mittaushetkellä vallitsevia ulkoilmaoloja. Molemmat painekäyrät ovat hyvin alipaineisia ja jäävät kauas tornihotellin oletetusta neutraaliakselista. Lasketusta painekäyrästä nähdään kuinka savupiippuvaikutuksen tuottama paine vähentää alipainetta rakennuksen yläpäässä tuulen voimistuvasta painevaikutuksesta huolimatta.

Kolmannen ja kahdeksannen kerroksen mittaustulokset ovat läntisen tuulen pyörteiden vaikutuksen alaisena, mikä esiintyy painekäyrän alaosissa suurena alipaineena. Kymmenennen kerroksen jälkeen alipaineisuus pysyy lähes vakiona. Länsituuli ja sen logaritminen voimakkuuden kasvu kumoaa täysin mittaushetkellä vallitsevan savupiippuvaikutuksen. Tästä voidaan olettaa tuulen painevaikutuksen olevan odotettua suurempi, mitä laskettu painevaikutus.

4 POHDINTA

Tutkimus on onnistunut tuomaan esille korkean rakennuksen painesuhteisiin vaikuttavia ilmiöitä, joita ovat esimerkiksi savupiippuvaikutus ja tuulen painevaikutus. Saatuja tietoja on hyvä käyttää tulevaisuudessa korkeiden rakennusten suunnittelutyössä, etenkin rakennuksen tiiveyteen tulisi kiinnittää erityistä huomiota. Tutkimuksen tuloksia voitaisiin myös soveltaa jatkotutkimuksessa, jossa selvitetäisiin vaihtoehtoisia keinoja ehkäistä painesuhteiden muutoksia.

Tutkimuksessa saatujen tulosten mukaan savupiippuvaikutus vahvistuu sisä- ja ulkoilman lämpötilaerojen kasvaessa, joten se on talvella voimakkaampaa mitä kesällä. Savupiippuvaikutuksen paine-eroja vahvistavat myös suuret ilmatilavuudet esimerkiksi porraskäytävät sekä hissikuilut ja hallit. Tornihotellista löytyy koko rakennuksen korkeuden kattavat hissikuilut sekä porraskäytävä, jotka voivat voimistaa tornihotellin savupiippuvaikutusta. Mittaukset tehtiin aina huoneistojen käytävän puolelta, joten ne eivät olleet rappukäytävän läheisyydessä, joka olisi voinut aiheuttaa mittauksiin häiriöitä. Lisäksi rappukäytävän ovet ovat tiiviitä palo-ovia, jotka eristävät painevaikutusaluetta leviämstä käytävän puolelle.

Mittauksissa esiintyvät paine-erot eivät ole pitkittyneellä aikavälillä terveellisiä rakenteille, sillä liian ylipaineinen rakennus saattaa kerätä kosteutta ilman vuokohtiin. Tämä tarkoittaisi sitä, että tornihotellin yläkerrokset voivat olla riskialttiita kosteusvaurioille. Muita haittoja löydettiin henkilökohtaisella havainnoinnilla pistokoemittauksia tehdessä, joista pystyi todentamaan savupiippuvaikutuksen läsnäolon. Lisähavaintoja olisi voinut saada tarkastelemalla tornihotellin ääripäitä eli kellaria ja 25. kerroksessa sijaitsevaa Moro sky bar:ia.

Parannusehdotuksena savupiippuvaikutuksen mittaamiselle olisi kytkeä kiinteistöautomaatioon useampi paine-ero mittari, jotka sijaitsisivat kullakin pääilmansuuntaisilla ulkoseinillä. Neljä mittaria pääilmansuunnissa mahdollistaisi savupiippuvaikutuksen ja tuulen painevaikutuksen erittelyn, jolloin tuulen vaikutus olisi mahdollista laskea pois. Mittarit tulisi suojata tuulen suoralta vaikutukselta, jotta äkilliset puuskat tai pyörteet ei sekoittaisi mittaustuloksia.

Mittaustuloksia työstettäessä havaittiin tuulen painevaikutuksen olevan myös merkittävä tekijä painesuhteiden muutoksiin. Tuulen vaikutuksen ansiosta tornihotelli on ajoittain erittäin alipaineinen, jolloin alipaineisuuden tuottamat haittavaikutukset ovissa ja hisseissä voimistui. Tuulen suunnalla oli myös suuri merkitys automaation mittaamiin tuloksiin, sillä mittarit sijaitsevat vain läntisellä ulkoseinällä. Tornihotellin länsipuolella sijaitseva vanha vesitorni lisää luultavasti tuulen pyörteisyyttä ja aiheuttaa ajoittain vaihtelevia tuloksia tornihotellin alakerroksissa. Lisäksi 13. kerroksen painetulokset ovat tasaisesti alipaineisempia mitä muiden kerrosten suoraa linjaa piirtävä painekäyrä. Tämän pystyy erottamaan kuvaajasta 5, josta näkee koko mittausajanjakson keskiarvollisen painekäyrän.

Tuuliolojen laskenta antaa vain suuntaa antavia tuloksia, joten olisi tärkeämpää tehdä tarkempia mittauksia tuulen painevaikutuksista, jotta siitä saataisiin tarkempi näkemys. Sweco Talotekniikka Oy:n automaatiosuunnittelija oli suunnitellut tornihotelliin asennettavaksi sääaseman, mutta se karsittiin pois lopullisesta toteutuksesta. Sääasemalla olisi saatu tarkempia tietoja tuuliolosuhteista, joka olisi edesauttanut tuulen paine-eroja aiheuttavan ilmiön erottelussa savupiippuvaikutuksen tuloksista.

Tällä painesuhdeselvityksellä on tavoitteena havainnollistaa rakennuksiin ja korkeisiin rakennuksiin kohdistuvia paine-eroja ja niiden muutoksia, joten laskelmat ja mittaukset ovat tehty tarpeeksi tarkasti täyttämään tavoitteelliset arvot.

LÄHTEET

Asumisterveysopas. 2009. Sosiaali- ja terveysministeriö. Ympäristö ja terveys-lehti.

Ross, D. 2004. Desing guide for tall commercial buildings

Sandberg, E. 2014. Ilmastointitekniikka osa 2

Seppänen, O. 2007. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka.

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka

Sisäilmayhdistys, ilmavirtaukset rakennuksessa. Luettu 12.3.2015

<http://www.sisailmayhdistys.fi>

Suomen RakMK C3. 2010. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen lämmöneristyksestä. Määräykset 2010. Helsinki: Ympäristöministeriö, rakennetun ympäristön osasto.

Suomen RakMK D2. 2012. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö, rakennetun ympäristön osasto.

Suomen tuuliatlas. Luettu 14.4.2015

<http://www.tuuliatlas.fi>

Suomen tuulivoimayhdistys ry. Luettu 16.4.2015

<http://www.tuulivoimatieto.fi>

WindGURU. Luettu 13.5.2015

<http://www.windguru.cz/int/index.php>

Tanarath, B. 2010. Reinforced concrete design of tall buildings. Luettu 19.5.2015

<https://menglim498.files.wordpress.com/2013/04/reinforced-concrete-design-of-tall-building.pdf>